

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO : ENGENHARIA
DE PROCESSOS

TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA EM LEITO DE JORRO
BIDIMENSIONAL

Por: Roberto Cabral de Aquino Filho

Orientador: Sandra Cristina dos Santos Rocha

Dissertação submetida à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de
Engenharia Química - UNICAMP - como parte dos requisitos necessários
para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Química.

Novembro de 1995

Campinas - SP



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	17/UNIOAMP
	Aq 56t
V.	Ex.
TOMBO BC	32829
PROC.	395/98
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PRECO	R\$ 11,00
DATA	22/01/98
N.º CPD	

CM-00105144-8

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Aq56t Aquino Filho, Roberto Cabral de
Transferência de calor gás-partícula em leito de jorro
bidimensional / Roberto Cabral de Aquino Filho.--
Campinas, SP: [s.n.], 1996.

Orientador: Sandra Cristina dos Santos Rocha.
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Calor - Transferência. 2. Processo de leito de jorro.
I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Química.
III. Título.

Esta versão corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por Roberto Cabral de Aquino Filho e aprovada pela banca examinadora em 30 de janeiro de 1996.

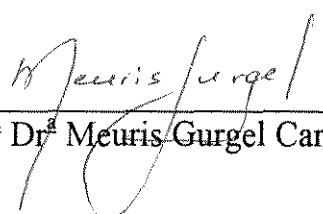
A handwritten signature in black ink, appearing to read 'S. Rocha', is positioned above a horizontal line.

Prof^a Dr^a Sandra Cristina dos Santos Rocha

Dissertação de mestrado defendida e aprovada em 30 de Janeiro de 1996
pela Banca Examinadora constituída pelos Professores:


Profª Drª Sandra Cristina dos Santos Rocha


Prof. Dr. Leonardo Goldstein Junior


Profª Drª Meuris Gurgel Carlos da Silva

AGRADECIMENTOS

À Prof.^a Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha pela orientação e apoio oferecidos na elaboração deste trabalho.

À Faculdade de engenharia Química da UNICAMP.

Ao CNPQ pela bolsa de mestrado.

Aos amigos do grêmio, responsáveis pelos melhores momentos vividos durante a realização deste trabalho.

À minha mãe: Lia

Aos meus irmãos: Angela e Antonio Roberto

RESUMO

O leito de jorro bidimensional surgiu na tentativa de resolver-se o problema de “scale-up” do leito de jorro convencional e mostrou-se adequado no que diz respeito à circulação de sólidos, o que levou os pesquisadores a aprofundarem-se no seu estudo.

Entretanto - assim como no leito convencional - quando o assunto era a transferência de calor gás-partícula, muitas dúvidas surgiam no que diz respeito à área de troca térmica e ao papel da região anular.

Na tentativa de mostrar a diferença entre a transferência de calor na região anular e de jorro, este trabalho procurou estudar as duas regiões separadamente calculando coeficientes de transferência de calor gás-partícula distintos para as duas regiões, cujos valores evidenciaram estas diferenças.

Além do cálculo dos coeficientes, foi feito um estudo da influência da altura do leito estático, diâmetro das partículas, temperatura de entrada do gás e ângulo da base inclinada no valor do coeficiente, através de um planejamento fatorial de experimentos. Esse estudo também foi feito separadamente para as regiões de jorro e anular, que apresentaram comportamento diferente ajudando ainda mais a mostrar as diferenças entre as duas regiões.

Por fim foram propostas duas correlações que permitem o cálculo do número de Nusselt em função das variáveis estudadas, uma para a região anular e outra para a região de jorro. As duas correlações apresentaram um desvio satisfatório em relação aos dados experimentais, validando sua utilização dentro das faixas especificadas.

ABSTRACT

The two-dimensional spouted bed was proposed to minimize the scale-up problems of the conventional spouted bed. It is very easy to construct and allows adequate solids circulation when provided with a slanted base. So a lot of work was done concerning the two-dimensional spouted bed.

While progress has been made in the understanding of spouted beds dynamics, gaps still exists in the area of heat transfer. These include information about the heat transfer area and role of the annulus.

In this work, experiments were performed in a two dimensional spouted bed to evaluate the gas-to-particle heat transfer coefficient in the spout and annular regions. The results obtained showed very different values for the two distinct regions.

A factorial design at two levels was performed to investigate the influences of particle diameter, bed height, gas inlet temperature and angle of conical base in the heat transfer coefficient. The influences of these variables were verified separately in the spout and annulus and showed different results.

The experimental data were correlated in the form of two dimensionless equations for annular and spout Nusselt Number in terms of the variables studied.

NOMENCLATURA

ap_a = área superficial das partículas presentes na região anular (m^2).

ap_j = área superficial das partículas presentes na região de jorro (m^2).

A_{ja} = área através da qual ocorre a transferência de calor da região de jorro para a região anular (m^2).

Ar = número de Arquimedes.

Cp_a = capacidade térmica do gás na temperatura da região anular (Kcal / Kg . $^{\circ}C$).

Cp_j = capacidade térmica do gás na temperatura da região de jorro (Kcal / Kg . $^{\circ}C$).

d = largura das placas internas (m).

dp = diâmetro das partículas (m).

d^2 = área da seção transversal do jorro (m^2).

Gr_L = número de Grasshof.

ha = coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula na região anular (Kcal / h . m^2 . $^{\circ}C$).

hj = coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula na região de jorro (Kcal / h . m^2 . $^{\circ}C$).

h_{ja} = coeficiente convectivo de transferência de calor da região de jorro para a região anular (Kcal / h . m^2 . $^{\circ}C$).

H = altura das placas internas (m).

Ha = altura da região anular (m).

Hj = altura do jorro (m).

Hm = altura máxima de jorro estável (m).

Ho = altura do leito estático (m).

k_w = condutividade da placa interna (kcal / h . m . $^{\circ}C$)

L = espessura das placas internas (m).

\dot{M} = vazão de ar medida na tubulação de alimentação do leito de jorro (Kg / s).

\dot{M}_a = vazão de ar na região anular (Kg / h).

\dot{M}_j = vazão de ar na região de jorro (Kg / h).

Nu = número de Nusselt.

Nu_a = número de Nusselt para a região anular.

Nu_j = número de Nusselt para a região de jorro.

P = queda de pressão na placa de orifício (cmH₂O).

P_e = pressão estática na tubulação de alimentação do leito de jorro (cmH₂O).

P_L = queda de pressão ao longo do leito de jorro (cmH₂O).

P_t = pressão lida no transdutor de pressão (mV).

Q_{ja} = calor cedido pela região de jorro para um lado da região anular (Kcal / h).

Re_a = número de Reynolds para a região anular.

Re_j = número de Reynolds para a região de jorro.

t_a = temperatura do ar na tubulação de alimentação do leito de jorro (°C).

T_{ga} = temperatura média do gás na região anular (°C).

T_{gj} = temperatura média do gás na região de jorro (°C).

T_s = temperatura da superfície externa do leito de jorro (°C).

T_{pa} = temperatura das partículas na região anular (°C).

T_{pj} = temperatura das partículas na região de jorro (°C).

T_{wa} = temperatura média ao longo das placas internas pelo lado da região anular (°C).

T_{wj} = temperatura média ao longo das placas internas pelo lado da região de jorro (°C).

T_{g1} = temperatura de entrada do gás (°C).

T_{g2a} = temperatura de saída do gás acima da região anular (°C).

T_{g2j} = temperatura de saída do gás acima da região de jorro (°C).

$T1$ = temperatura medida na parte mais baixa da região de jorro junto a uma das placas internas (°C).

$T2$ = temperatura medida na parte média da região de jorro junto a uma das placas internas (°C).

$T3$ = temperatura medida na parte mais alta da região de jorro junto a uma das placas internas (°C).

$T4$ = temperatura medida na parte mais baixa da região anular junto a uma das placas internas (°C).

$T5$ = temperatura medida na parte média da região anular junto a uma das placas internas (°C).

$T6$ = temperatura medida na parte mais alta da região anular junto a uma das placas internas (°C).

T_{∞} = temperatura ambiente (°C).

u_a = velocidade do ar na região anular (m / s).

u_{mf} = velocidade mínima de fluidização (m / s).

v_a = velocidade do gás na região anular (m / s).

V_a = volume da região anular (m³).

V_j = volume da região de jorro (m³).

Símbolos Gregos

α = ângulo da base cônica.

ϵ_a = porosidade da região anular.

ϵ_j = porosidade da região de jorro.

μ_a = viscosidade do gás na temperatura média da região anular (Kg / m . s).

μ_g = viscosidade dinâmica do gás (Kg / m . s).

ρ_a = densidade do gás na temperatura média da região anular (Kg / m³).

ρ_g = densidade do gás (Kg / m³).

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Segundo Mathur e Epstein (1), o leito de jorro foi desenvolvido inicialmente como um método para secagem de trigo. Os primeiros pesquisadores estudaram as características do leito de jorro utilizando vários tipos de sólidos e ar e água como fluido de jorro. A conclusão inicial a que chegaram foi de que o leito de jorro parecia obter com partículas grosseiras o mesmo resultado que o leito fluidizado obtinha com partículas mais finas.

Os sistemas de contato gás-sólido são geralmente classificados em três categorias: (a) não-agitados, que incluem os leitos fixos e móveis; (b) mecanicamente agitados, onde a agitação pode vir do movimento do próprio vaso como nos secadores rotativos, ou através de um agitador interno; (c) sistemas agitados por gás, onde uma agitação mais intensa é fornecida às partículas sólidas pela ação de uma corrente de gás. Nesse último caso incluem-se os leitos fluidizados e suspensos.

O leito fluidizado tem sido bastante utilizado em processos que envolvem reação química, devido aos altos coeficientes de transferência de calor e massa que originam-se da grande área superficial dos sólidos envolvidos.

No Manual de Engenharia Química (2), o leito de jorro é colocado na categoria onde encontram-se os sistemas de leito móvel. Isso é explicado pelo fato da região anular - que contém a maior parte dos sólidos - assemelhar-se a um leito móvel descendente com fluxo contracorrente de gás. Entretanto, devido ao fato de ocorrer uma boa mistura dos sólidos que ficam em recirculação, o sistema também aproxima-se do leito fluidizado em suas características.

Apesar da constatação inicial de que o leito de jorro atinge o mesmo objetivo do que o leito fluidizado, só que para partículas mais grosseiras, também constatou-se que o movimento cíclico e mais ordenado das partículas - contrariamente ao movimento mais aleatório do leito fluidizado - é uma característica de grande importância para certas aplicações, como nos processos de granulação e recobrimento de partículas.

Segundo Mathur e Epstein (1), as primeiras unidades comerciais de leito de jorro foram instaladas no Canadá em 1962, com o objetivo de secagem de ervilhas, lentilhas e linho. Desde então várias unidades foram construídas em diferentes países para várias finalidades tais como mistura, refrigeração, recobrimento e granulação de sólidos.

A revisão da literatura mostra que os trabalhos realizados sobre leito de jorro até o momento conseguiram elucidar razoavelmente bem a fluidodinâmica do equipamento, visto que já é possível a previsão de velocidade mínima de jorro, queda de pressão no máxima, altura máxima de jorro estável, etc.

Como já foi dito, o leito de jorro - diferentemente do leito fluidizado ou leito móvel - é bastante heterogêneo, sendo formado por regiões bem distintas (anular, jorro e fonte). Esse aspecto tem dificultado um embasamento teórico na transferência de calor que permita a solução dos problemas, já que é difícil a obtenção de condições de contorno entre essas regiões, prejudicando sua formulação diferencial.

Portanto tratando-se de transferência de calor, a maioria dos trabalhos apresentados até o momento tem como objetivo a determinação do coeficiente de troca térmica em três situações distintas:

- entre o fluido e sólidos,

- entre o leito e parede,
- entre o leito e corpos submersos.

Embora o leito de jorro convencional tenha mostrado-se bastante eficiente como um sistema de contato gás-sólido, somente para uma estreita faixa de dimensões do vaso é que se tem obtido um jorro estável, caracterizado por um movimento regular e cíclico dos sólidos.

O leito de jorro bidimensional foi proposto inicialmente por Mujumdar (3), com o objetivo de minimizar os problemas de “scale-up”. Segundo Kudra et al (4), o leito de jorro bidimensional é uma das mais promissoras modificações do leito convencional, visto que sua geometria retangular torna mais fácil o “scale-up” reduzindo o problema para duas dimensões apenas.

O objetivo deste trabalho é estudar a transferência de calor gás-partícula em leito de jorro bidimensional. Com este propósito foi realizado um planejamento fatorial de experimentos, onde estudou-se a influência da temperatura de entrada do gás, diâmetro das partículas, altura do leito estático e ângulo da base cônica no coeficiente de transferência de calor gás-partícula. Além disto foram propostas correlações para o cálculo do número de Nusselt em função das condições experimentais.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- O LEITO DE JORRO

O leito de jorro consiste de um vaso aberto no topo e cheio de partículas sólidas relativamente grosseiras. Um fluido é injetado verticalmente através de uma pequena abertura central localizada na base do vaso. O fluxo de fluido provoca uma corrente ascendente de partículas, formando um duto central em meio ao leito de sólidos. Essas partículas após alcançarem uma altura acima do nível periférico do leito caem de volta na região anular entre o duto central e a parede do vaso, formando um leito poroso descendente com percolação contra-corrente de fluido (fig. 2.1). O duto central é chamado de jorro e a região periférica é chamada de ânulo. A região em forma de cogumelo acima do nível do ânulo é chamada de fonte. Para melhorar a circulação de sólidos e eliminar espaços mortos usa-se uma base cônica divergente.

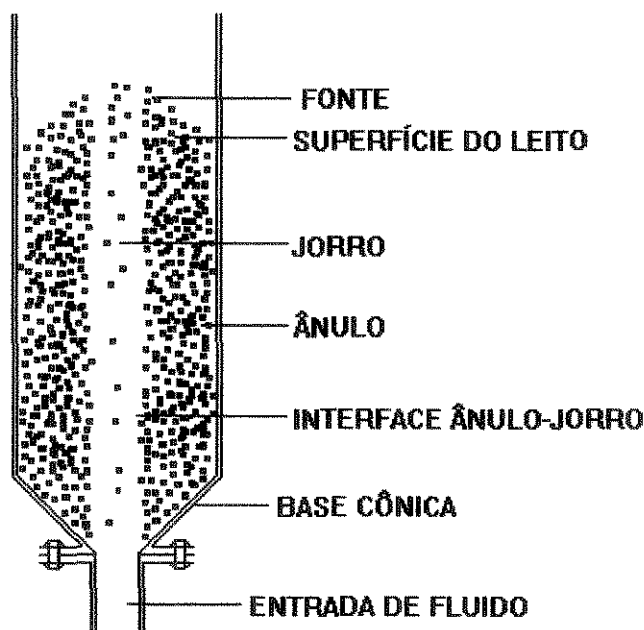


FIGURA 2.1 - O LEITO DE JORRO

2.2- DINÂMICA DO LEITO DE JORRO

O jorro é um fenômeno que pode ser observado visualmente e ocorre em uma faixa de velocidade de fluido bem definida para uma dada combinação de fluido, sólido e geometria do vaso. A figura 2.2 mostra a transição de fase com o crescimento do fluxo de fluido. Os diagramas de fase (fig.2.3.a - 2.3.b) mostram que para um material sólido contactado por um fluido específico, em um vaso de geometria específica, existe uma altura máxima do leito H_m , além da qual o jorro é trocado por fluidização de má qualidade.

Pode-se visualizar melhor a transição de leito estático para leito de jorro através da análise de um gráfico de queda de pressão no leito versus velocidade superficial do fluido (fig. 2.4):

- (a)- A baixas vazões o gás simplesmente passa através das partículas sem provocar distúrbios. A queda de pressão aumenta com a vazão ao longo de AB.
- (b)- Com o aumento da vazão forma-se um jorro interno abaixo de um arco de sólidos compactados. À medida que a vazão é aumentada além do ponto B (ponto de queda de pressão máxima), a altura do jorro interno torna-se grande em relação ao leito de sólidos empacotados acima do jorro. Portanto a queda de pressão cai ao longo de BC.
- (c) - Com um pequeno aumento na vazão além do ponto C que é chamado ponto de jorro incipiente, o jorro interno quebra-se através da superfície do leito causando uma nítida redução na queda de pressão até o ponto D, no qual todo o leito torna-se móvel e tem início o jorro estável.
- (d) - Aumentando-se mais a vazão de fluido, este simplesmente passa através da região de jorro sem um efeito significativo na queda de pressão total. Portanto a queda de pressão ($-\Delta P_s$) além do ponto D torna-se substancialmente contante.
- (e) - A curva obtida no caminho inverso - com redução gradativa da vazão - é mais baixa do que no processo de fluxo crescente, visto que a energia requerida pelo jato de fluido para penetrar os sólidos não é requerida durante o colapso do jorro.

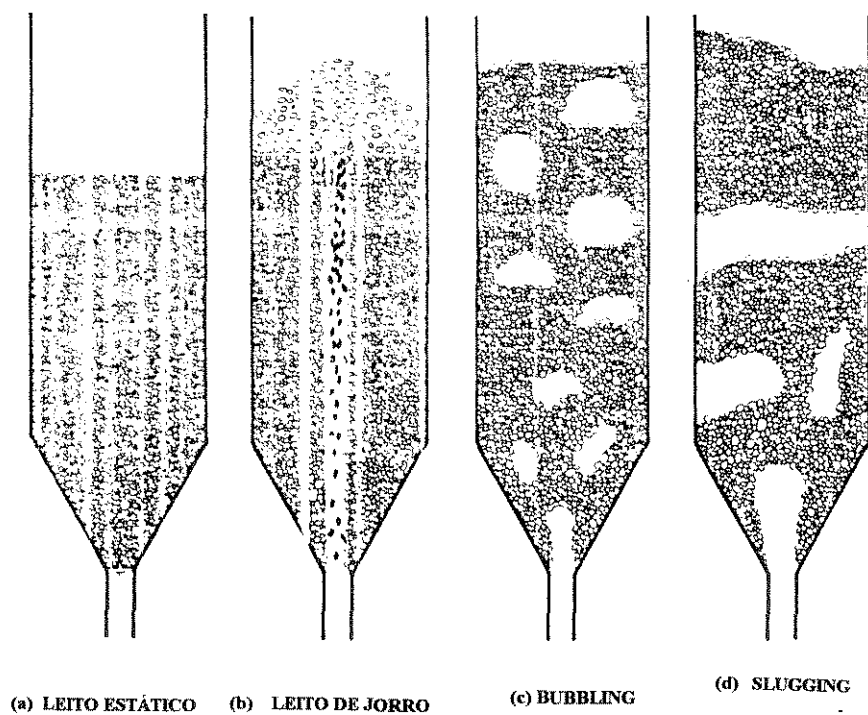


FIGURA 2.2 - TRANSIÇÃO DE FASE COM AUMENTO DA VAZÃO DE GÁS. MATHUR E EPSTEIN (1).

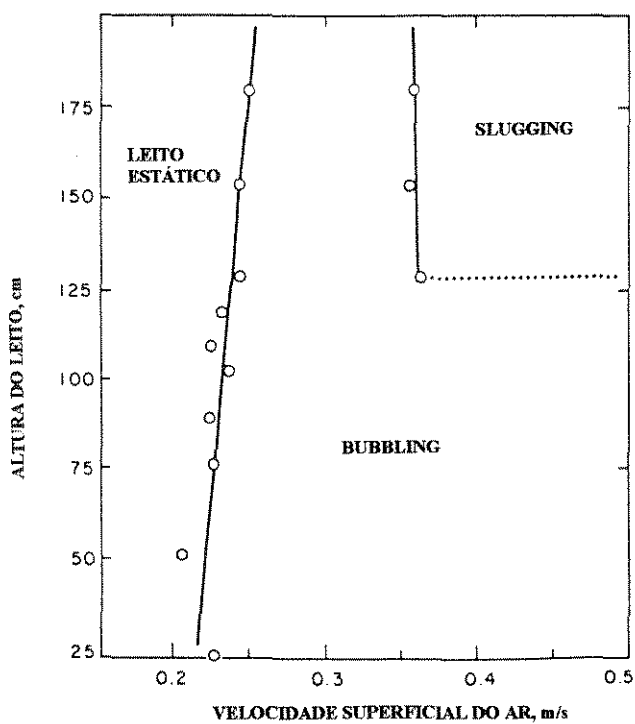


FIGURA 2.3.a - DIAGRAMA DE FASE. AREIA; $d_p = 0,42-0,83$ mm; $D_c = 15,2$ cm; $D_i = 1,25$ cm. MATHUR E EPSTEIN (1).

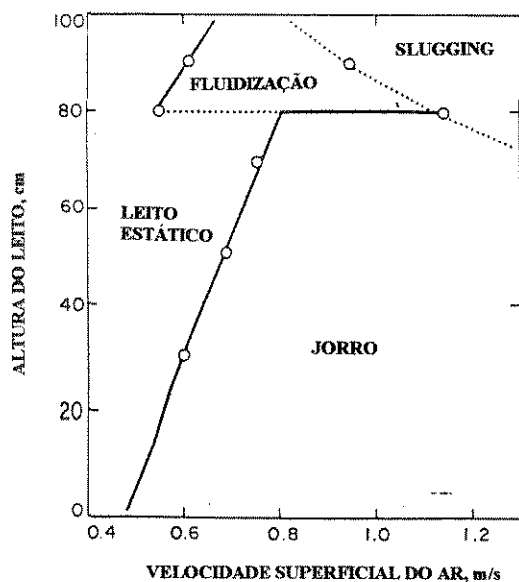


FIGURA 2.3.b - DIAGRAMA DE FASE. CARVÃO; $d_p = 1 - 5 \text{ mm}$; $D_c = 23,5 \text{ cm}$; $D_i = 3,05 \text{ cm}$. MATHUR E EPSTEIN (1).

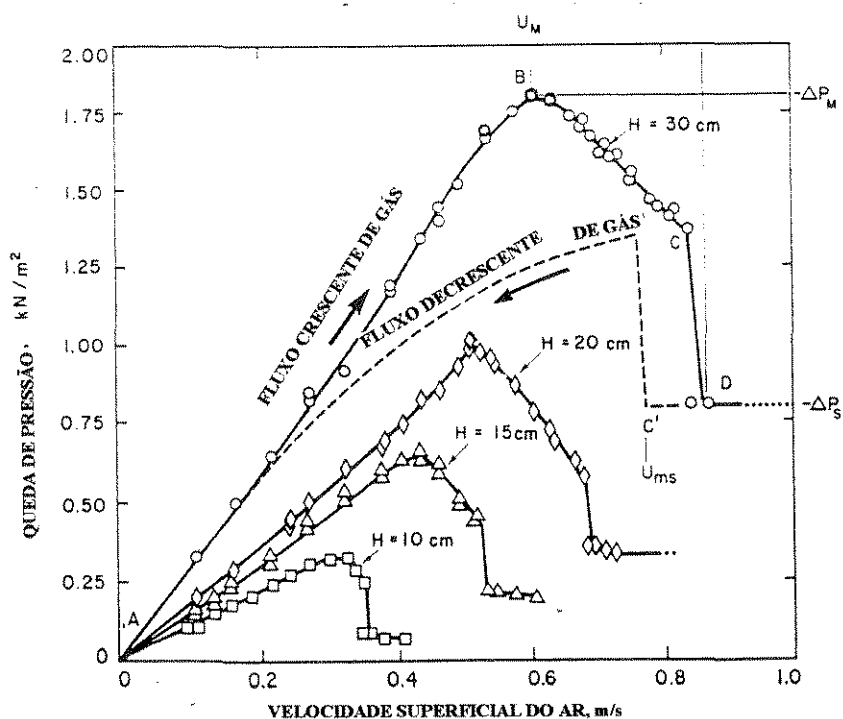


FIGURA 2.4 - CURVA TÍPICA DE QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO VERSUS VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS.

TRIGO; $d_p = 3,6 \text{ mm}$; $D_c = 15,2 \text{ cm}$; $D_i = 1,27 \text{ cm}$; $\theta = 60^\circ$. MATHUR E EPSTEIN (1).

2.3- TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA

O coeficiente convectivo de troca térmica é definido pela seguinte equação:

$$Q = h \cdot A \cdot (Tr_1 - Tr_2) \quad (2.1)$$

onde A é a área de troca térmica e Tr_1 e Tr_2 são as temperaturas de referência.

Os vários pesquisadores tem encontrado diferentes valores do coeficiente de troca térmica justamente devido a diferenças nas escolhas das áreas de troca térmica e nas temperaturas de referência (temperatura do fluido e sólidos). Portanto torna-se necessário deixar bem claro a definição da área de troca térmica e das temperaturas de referência.

A revisão da literatura feita por MATHUR e EPSTEIN (5) mostra os dados obtidos por UEMAKI e KUGO (6) que determinaram o coeficiente de troca térmica entre gás e partícula em uma coluna de diâmetro 9,2 cm, com altura de carga entre 12 e 15 cm para partículas de diversos materiais e tamanhos (densidade entre 0,93 e 2,54 g/cm e diâmetro entre 1 e 4 mm). O gás utilizado foi ar a 70 °C e a velocidade do gás foi variada até superar em 50 % a velocidade mínima de jorro. UEMAKI e KUGO (6) assumiram que todo calor do gás era transferido para as partículas na região de jorro. A temperatura na equação (2.1) foi tomada como sendo a média da diferença entre a temperatura do gás no jorro e a temperatura das partículas na mistura. A área de troca térmica no entanto não foi limitada à região de jorro mas foi tomada como sendo a área total das partículas presentes no leito. Procedendo dessa maneira os autores obtiveram valores para o coeficiente entre 3,4 e 17,0 W/m².K e a seguinte equação empírica válida para o ar:

$$h \cdot dp / k = 0,0005 \cdot (dp \cdot U_{ms} \cdot \rho_g / \mu_g)^{1,46} \cdot (U_s / U_{ms}) \quad (2.2)$$

MATHUR e EPSTEIN (1) obtiveram o coeficiente de troca térmica na região de jorro utilizando a equação de ROWE e CLAXTON (7), válida para altas porosidades e número de Reynolds da partícula superior a 1000:

$$Nu = A + B \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{0,55} \quad (2.3)$$

onde $A = 2 / [1 - (1 - \varepsilon)^{1/3}]$ e $B = 2 / (3 \cdot \varepsilon)$, e encontraram um valor de $400 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$. Esse valor é consistente com a superestimação da área de troca térmica feita por UEMAKI e KUGO (6) que usaram a área total das partículas, sendo que consideraram a transferência de calor como sendo realizada somente no jorro.

MATHUR e EPSTEIN (1) também determinaram o coeficiente de troca térmica da região anular utilizando a equação de LITTMAN e SILVA (8) para leito empacotado (válida para Reynolds < 100):

$$Nu = 0,42 + 0,35 \cdot Re^{0,8} \quad (2.4)$$

e encontraram um valor de $50 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

Assumindo por um momento que a troca de calor entre o gás e o leito de sólidos é controlado pelas condições externas e não por propagação de calor entre as partículas, MATHUR e EPSTEIN (1) consideraram que a temperatura média das partículas no leito é a mesma nas diferentes partes do leito. A queda na temperatura do fluido à medida que este sobe pelo leito é dada pela seguinte equação geral que presume “plug flow” do fluido:

$$(T_g - T_p) / (T_{g_i} - T_p) = \exp[(-6 \cdot h_p \cdot (1 - \varepsilon) \cdot z) / (u \cdot \rho_g \cdot C_{p_g} \cdot dp)] \quad (2.5)$$

onde:

T_g = temperatura do gás a uma distância z da entrada

T_{g_i} = temperatura de entrada do gás

T_p = temperatura média das partículas

As partículas foram supostas como sendo esféricas para simplificar a expressão da área superficial em termos de dp e ε .

No jorro a velocidade do gás (u) é bem maior do que no ânulo, enquanto que a concentração volumétrica de partículas ($1 - \varepsilon$) é muito menor do que na densa região anular. Como consequência do primeiro fator e apesar do segundo, o coeficiente de transferência de calor h_p no jorro é muito maior do que no ânulo, mas o último fator tem um efeito adverso na taxa de transferência de calor via área superficial da

partícula. Portanto o declínio na temperatura do gás nas duas regiões distintas deve ser bem diferente.

Substituindo-se valores de h_p calculados pelas equações (2.3) e (2.4) em (2.1), pode-se chegar à conclusão geral de que no ânulo o gás atinge um equilíbrio térmico com o leito a poucos centímetros de sua entrada no leito, enquanto que a distância para o gás atingir o equilíbrio no jorro é muito maior. UEMAKI e KUGO (6) já tinham chegado a essa conclusão em seu trabalho, o que é ilustrado pela figura 2.5.

A função do ânulo é importante e pode ser melhor elucidada ao considerar-se a história da temperatura da partícula circulando no leito, supondo um processo de aquecimento de sólidos. As partículas deixando o jorro estão mais quentes e vão transferir calor ao juntar-se aos sólidos na região anular. Essa transferência pode ocorrer parcialmente por condução para as partículas vizinhas e por convecção para o gás percolando através do ânulo. Deste modo a função indireta do ânulo é servir como sumidouro para as partículas que são aquecidas no jorro durante cada passagem.

Numa operação contínua, o ânulo tem uma função indireta mais importante, servindo como fonte de calor para as partículas frias. O tempo requerido para uma partícula alimentada atingir a temperatura dos sólidos na mistura é dada pela seguinte equação transiente obtida por MATHUR e EPSTEIN (1):

$$(T_p - T_{p_0}) / (T_b - T_{p_0}) = 1 - \exp[(h_p \cdot A_p \cdot t) / (m_p \cdot C_{p_p})] \quad (2.6)$$

onde T_p é a temperatura da partícula após um tempo de residência t no ânulo e T_{p_0} representa T_p em $t = 0$. Os termos A_p , m_p e C_{p_p} são a área superficial da partícula, massa e capacidade térmica, respectivamente.

A taxa na qual uma partícula fria na região anular recebe calor de sua vizinhança foi estudada por BARTON e RATCLIFFE (9) em um leito de carvão mantido sob condições de carbonização com uma mistura de ar e nitrogênio. Um termopar coberto com uma capa de prata do mesmo tamanho das partículas foi introduzido em uma posição fixa no ânulo e o coeficiente de transferência de calor

gás-partícula foi determinado da sua resposta transiente através da equação (2.6). Os valores obtidos foram de 130-141 W/m² .K.

Na fluidização os gradientes de temperatura intrapartícula normalmente são desprezados, mas estes gradientes podem ocorrer no leito de jorro devido ao maior tamanho das partículas usadas. A relação entre o gradiente de temperatura intrapartícula e o gradiente de temperatura entre a superfície da partícula e o meio externo é dado pelo número de Biot, $Bi_H = hp \cdot r_p / k_p$. O gradiente de temperatura intrapartícula decresce com o decréscimo de Bi_H , sendo que o máximo do gradiente de temperatura intrapartícula torna-se menos de 5 % do gradiente de temperatura externo a $Bi_H = 0,1$. Essa relação depende também do número de Fourier, $Fo_H = \alpha \cdot t / r_p^2$, decrescendo com o aumento de Fo_H .

O perfil de temperatura da partícula é governado pela equação transiente de difusão:

$$\partial T / \partial t = \alpha / r^2 \cdot \partial (r^2 \cdot \partial T / \partial r) / \partial r \quad (2.7)$$

e pode ser calculado como uma função do tempo através da solução numérica desta equação se os perfis de velocidade longitudinais do gás e partículas, temperatura do gás e porosidade no jorro forem conhecidos. A seguinte condição de contorno deve ser satisfeita:

$$k_p \cdot (\partial T / \partial r)_{r=r_p} = hp \cdot (T_g - T_{r=r_p}) \quad (2.8)$$

onde hp pode ser obtido de uma das relações anteriores.

MATHUR e EPSTEIN (1) resolveram a equação (2.7) e obtiveram o perfil de temperatura mostrado na figura 2.6. Uma análise da figura 2.6 mostra o aparecimento de um gradiente de temperatura na parte mais baixa do jorro que diminui à medida que a partícula sobe, chegando a aparecer um pequeno gradiente reverso na parte mais alta do leito. A aparente violação da segunda lei da termodinâmica, onde o gás continua a esfriar na presença de uma superfície mais quente, é explicada pela liberação de partículas frias no jorro ao longo do comprimento do leito.

Ainda segundo MATHUR e EPSTEIN (1), qualquer gradiente de temperatura desenvolvido no jorro seria efetivamente relaxado durante a descida da partícula na região anular. Quando a partícula chega na parte mais baixa da região anular e entra em contato com gás mais quente, um gradiente interno de temperatura poderia desenvolver-se novamente. Isso implicaria que o declínio da temperatura do gás seria mais lento do que na ausência de gradiente interno de temperatura. Mas com a grande área de troca térmica no ânulo o equilíbrio térmico entre o gás e os sólidos seria rapidamente alcançado nesta região. Portanto o gradiente de temperatura intrapartícula na região anular não afetaria significativamente a eficiência térmica do processo.

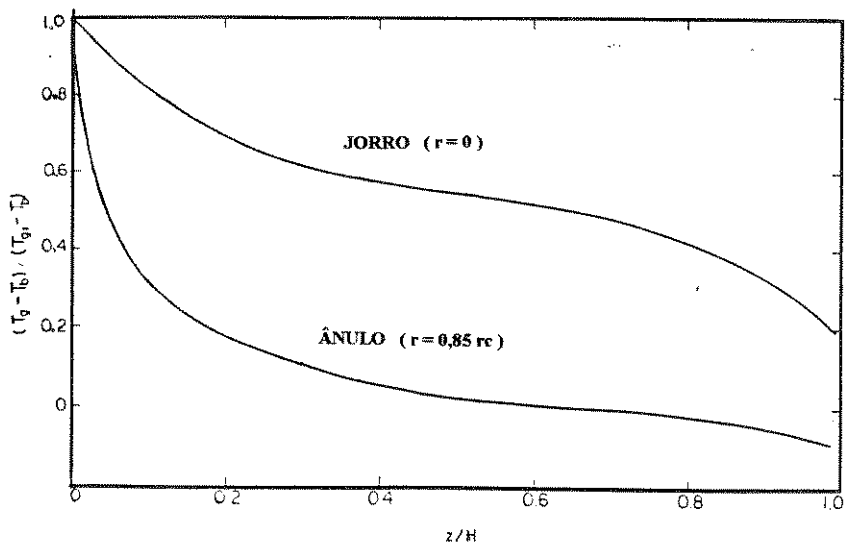


FIGURA 2.5 - PERFIL DE TEMPERATURA DO GÁS EM UM LEITO DE JORRO COM AR QUENTE BASEADO NAS MEDIDAS DE UEMAKI E KUGO (1).

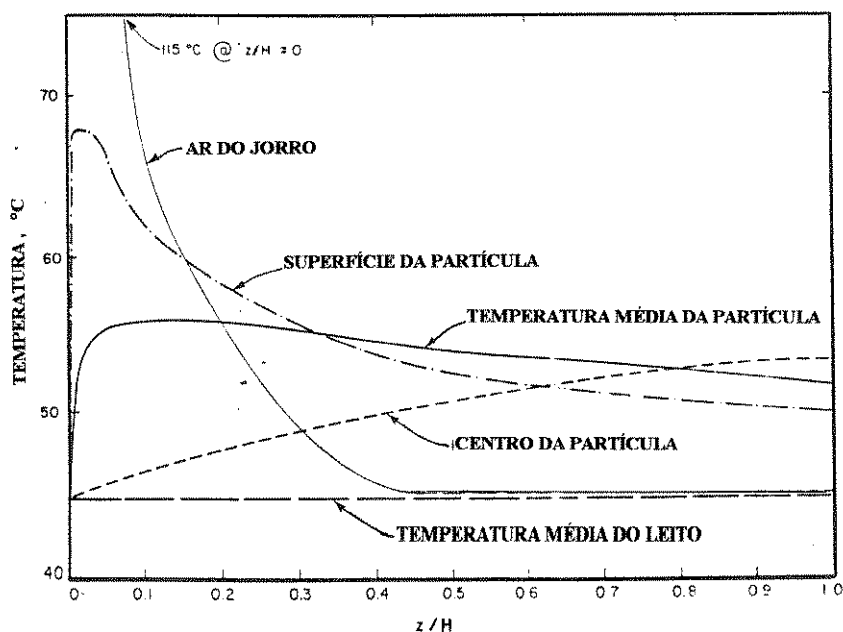


FIGURA 2. 6 - PERFIL DE TEMPERATURA DE UMA PARTÍCULA EM UM LEITO DE JORRO. $D_c = 30,5$ cm; $H = 61$ cm; $D_i = 5,1$ cm; $r_p = 1,8$ mm. MATHUR E EPSTEIN (1).

KMIEC (10) estudou a transferência de calor gás-partícula em leito de jorro utilizando apenas a parte cônica de uma coluna de 9 cm de diâmetro por 57 cm de altura (parte cilíndrica) e ângulos de 30° e 90° com uma entrada para o ar de 13 mm. Foram realizadas corridas em batelada para a secagem de sílica-gel e carvão ativo de diversos diâmetros (0,27 a 3,31 mm) utilizando-se ar a 50°C . A temperatura da coluna foi mantida constante através de isolamento e aquecimento elétrico com controlador.

Para o cálculo do coeficiente de troca térmica Kmiec utilizou a equação 2.1, sendo que o fluxo de calor foi calculado através do método da taxa de secagem utilizando-se a equação de fluxo de vapor:

$$Q = m_v \cdot (X_2 - X_1) \cdot \lambda \quad (2.9)$$

onde m_v é a taxa de transferência de vapor, X_2 e X_1 são as umidades do ar na saída e entrada do leito respectivamente e λ é o calor latente de vaporização. A área de troca térmica foi considerada como sendo a área total das partículas

presentes no leito e a diferença de temperatura foi tomada como a média logarítmica entre as temperaturas de entrada e saída do ar e a temperatura do ar na superfície das partículas (temperatura de bulbo úmido). O autor adverte que essa média de temperatura não tem significado físico, implicando no significado físico do coeficiente calculado.

Aplicando uma análise dimensional e ajuste por mínimos quadrados KMIEC (10) encontrou a seguinte correlação:

$$Nu = 0,897 \cdot Re^{0,464} \cdot Pr^{0,333} \cdot Ar^{0,116} \cdot (\operatorname{tg}(\alpha / 2))^{-0,813} \cdot (Ho / dp) \quad (2.10)$$

As figuras 2.7 a 2.9 mostram o comportamento dos coeficientes calculados em função da velocidade superficial do gás, diâmetro médio das partículas e altura do leito.

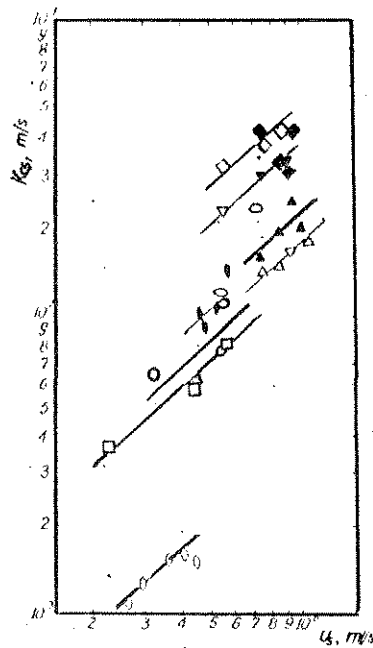


FIGURA 2.7 - COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS OBTIDOS POR KMIEC (10).

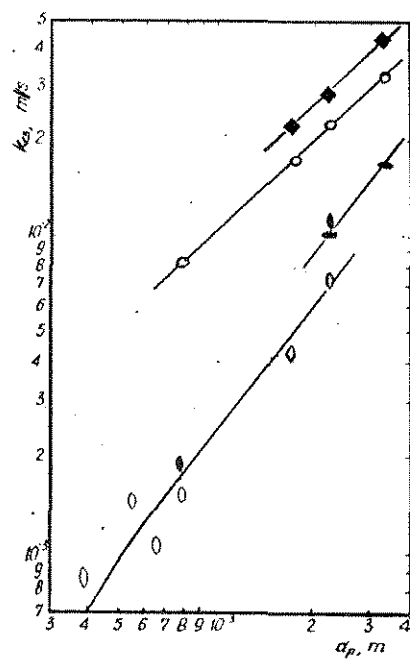


FIGURA 2.8 - COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA EM FUNÇÃO DO DIÂMETRO MÉDIO DAS PARTÍCULAS OBTIDOS POR KMIEC (10).

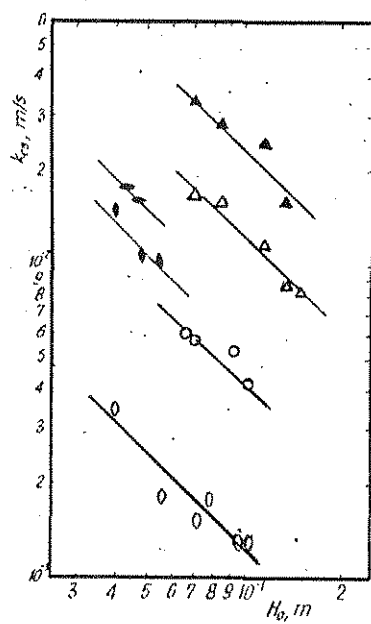


FIGURA 2.9 - COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA EM FUNÇÃO DA ALTURA DO LEITO OBTIDOS POR KMIEC (10).

REGER, ROMANKOV e RASHKOVSKAYA (11) investigaram a secagem de contas de vidro molhadas com um jato de spray de uma tinta corante e obtiveram a seguinte correlação empírica:

$$Nu = 0,0597 \cdot Ar^{-0,438} \cdot Re^{2,0} \cdot Gu^{0,61} \cdot (Ho / dp)^{-1} \quad (2.11)$$

sendo que foi utilizado o mesmo ΔT logarítmico da equação anterior, visto que os autores também utilizaram o método da taxa de secagem constante.

A figura 2.10 apresenta a comparação dos coeficientes de troca térmica obtidos por KMIIEC (10), REGER et all (11) e UEMAKI e KUGO (6), mostrando que os valores obtidos por Reger et all são muito maiores do que os obtidos pelos outros pesquisadores.

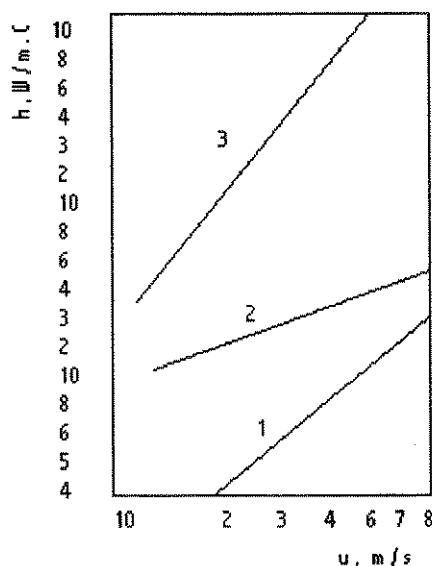


FIGURA 2.10 - COMPARAÇÃO DOS COEFICIENTES DE TROCA TÉRMICA CALCULADOS POR UEMAKI E KUGO (6), KMIIEC (10) E REGER ET ALL (11). SÍLICA-GEL; $\theta = 90^\circ$; $dp = 0,874$ mm; $Ho = 7,0$ cm.

Um estudo teórico sobre a transferência de calor gás-partícula em leito de jorro foi realizado por KMIEC (12), que assumiu duas zonas distintas onde ocorre a transferência de calor. Na região de jorro o gás transfere calor para as partículas e para a parede do jorro enquanto que na região anular o calor é dado às partículas pelo gás e pela zona de jorro. Kmiec também dividiu a região anular em duas - acima e abaixo da altura da parte cônica - e chegou a um sistema de três equações diferenciais que resolvidas numericamente apresentaram o resultado expressso em perfil de temperatura mostrado na figura 2.11.

O coeficiente de troca térmica gás-partícula na região de jorro foi calculado através da equação de KACZMARCZYK e BANDROWSKI (13) para o transporte pneumático de materiais granulares em transportadores verticais:

$$Nu = 0,00114 \cdot (1 - \varepsilon)^{-0,5984} \cdot [(u_s - u_p) \cdot dp \cdot \rho / \mu]^{0,8159} \quad (2.12)$$

O coeficiente de troca térmica na região anular foi calculado da equação dada por PETROVIC e THODOS (14):

$$J_H = 1,12 / Re^{0,363} \quad (2.13)$$

sendo que $J_H = (h / Cp \cdot \mu \cdot \rho) \cdot Pr^{2/3}$.

Através da distribuição de temperatura obtida (figura 2.11), KMIEC (12) obteve o coeficiente global de troca térmica gás-partícula para várias situações. As figuras 2.12 e 2.13 mostram a comparação dos coeficientes calculados com valores experimentais plotados em função da velocidade supeficial do gás na parte cilíndrica da coluna e da altura do leito.

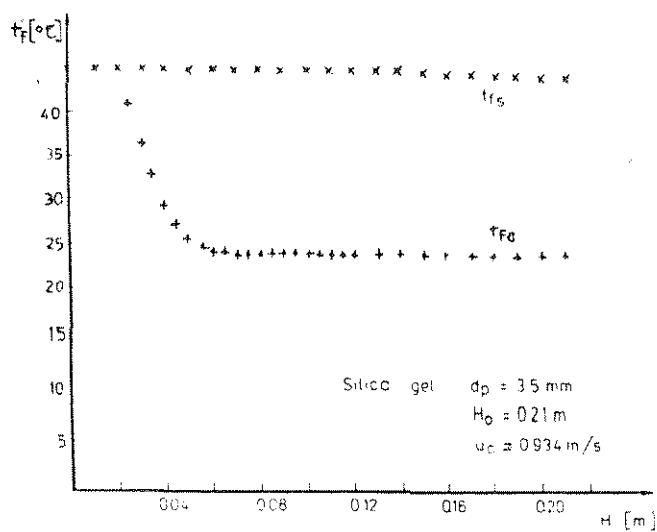


FIGURA 2.11 - DISTRIBUIÇÃO DE TEMPERATURA EM UM LEITO DE JORRO OBTIDO POR KMIEC (12) ATRAVÉS DA RESOLUÇÃO DE UM SISTEMA DE EQUAÇÕES DIFERENCIAIS. $D_c = 0,308 \text{ m}$; $D_i = 0,05 \text{ m}$.

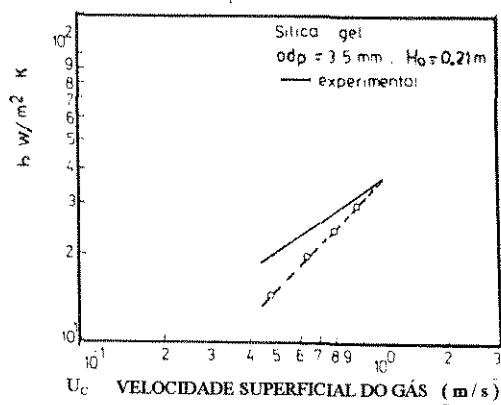


FIGURA 2.12 - COMPARAÇÃO DOS VALORES CALCULADOS POR KMIEC (12) COM VALORES EXPERIMENTAIS EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE SUPERFICIAL DO GÁS. $D_c = 0,308 \text{ m}$; $D_i = 0,05 \text{ m}$.

de temperatura do fluido, ficando claro que esta se restringe ao lado onde é feita a alimentação de partículas.

Segundo os autores, o perfil de temperatura plano no ânulo ocorre provavelmente devido a características do escoamento deslizante com grande concentração de partículas, enquanto que na região de jorro a diluição do número de partículas e a taxa de transferência de calor entre esta região e a anular levam a uma forma parabólica do perfil.

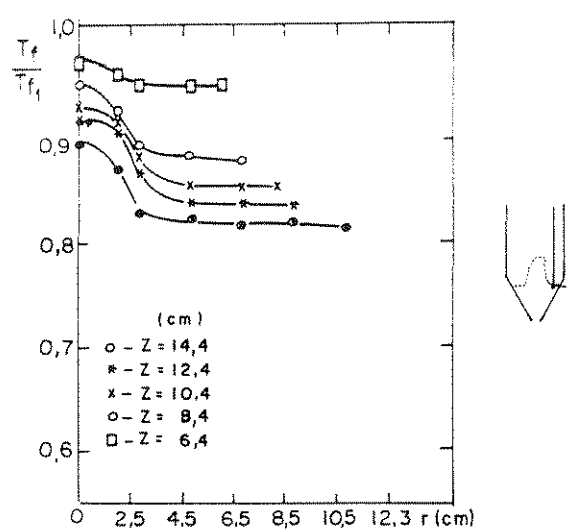


FIGURA 2.14 - TEMPERATURA DO FLUIDO EM FUNÇÃO DO RAIO OBTIDO POR PONTE E FREIRE (15).

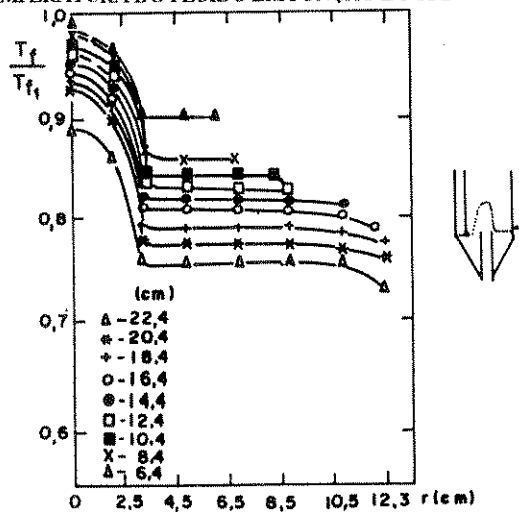


FIGURA 2.15 - TEMPERATURA DO FLUIDO EM FUNÇÃO DO RAIO PARA A COLUNA COM TUBO INTERNO OBTIDO POR PONTE E FREIRE (15).

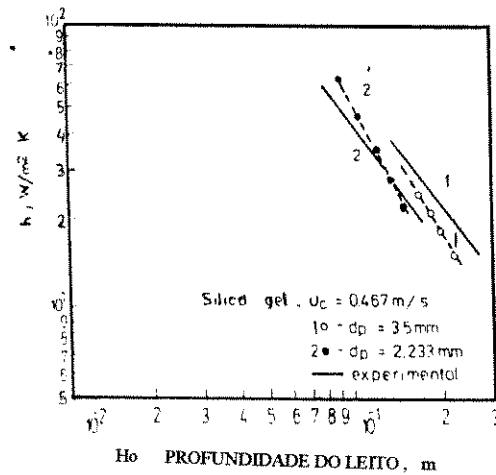


FIGURA 2.13 - COMPARAÇÃO DOS VALORES CALCULADOS POR KMEC (12) COM VALORES EXPERIMENTAIS EM FUNÇÃO DA ALTURA DO LEITO. $D_c = 0,308$ m; $D_i = 0,05$ m.

Como já foi dito anteriormente, a área de troca térmica é um fator de importância fundamental na determinação do coeficiente de transferência de calor gás-partícula visto que está ligado por definição ao mesmo. Preocupados em dar um maior significado físico ao coeficiente, PONTE e FREIRE (15) realizaram um estudo em uma coluna de 25,6 cm de diâmetro interno, 61,9 cm de altura, ângulo da base cônica de 60° , e diâmetro de entrada do jorro igual a 5 cm, no qual visava-se a determinação experimental da área onde efetivamente ocorria a transferência de calor do fluido para as partículas. As partículas utilizadas foram esferas de vidro de 0,3 cm de diâmetro e através de uma instrumentação adequada mediu-se a temperatura do fluido em todo o leito nas posições radiais, axiais e angular.

As figuras 2.14 a 2.19 apresentam os campos de temperatura do fluido no leito em função das posições radial, axial e angular respectivamente, para a coluna operando em sistema contínuo com e sem um tubo interno (draft).

A análise das figuras mostra a diferença significativa que existe entre a região anular e a região de jorro, o que é evidenciado no sistema que utiliza o tubo interno. A área onde ocorre a troca térmica também fica destacada pelos campos

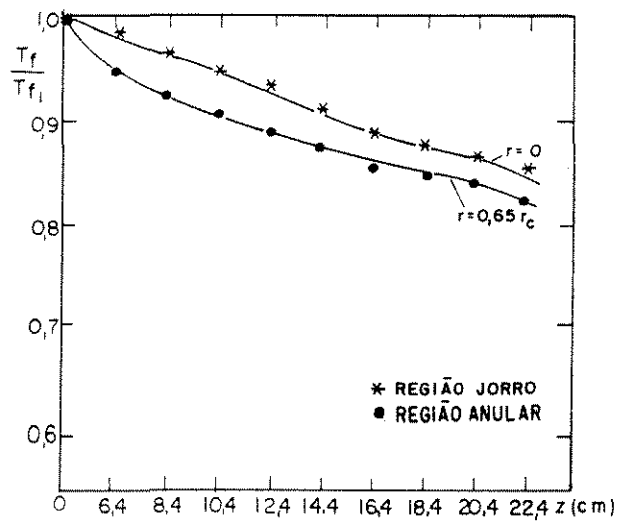


FIGURA 2.16 - TEMPERATURA DO FLUIDO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AXIAL OBTIDO POR PONTE E FREIRE (15).

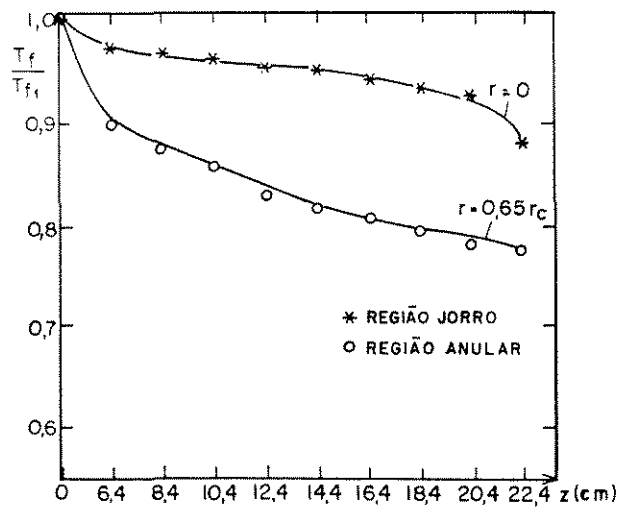


FIGURA 2.17 - TEMPERATURA DO FLUIDO EM FUNÇÃO DA DISTÂNCIA AXIAL PARA A COLUNA COM TUBO INTERNO OBTIDO POR PONTE E FREIRE (15).

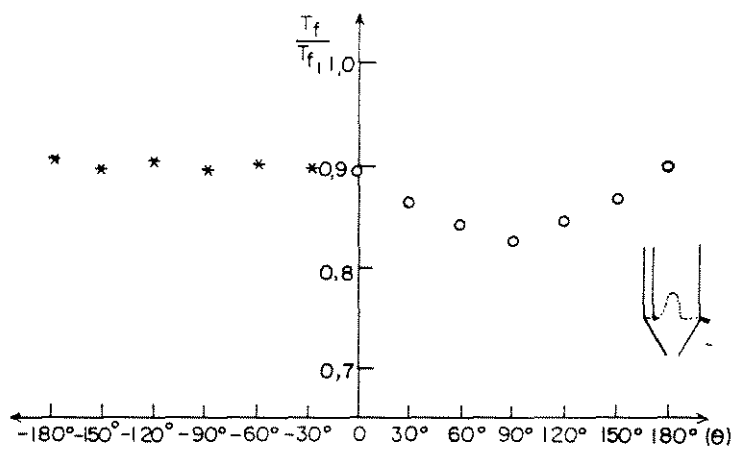


FIGURA 2.18 - TEMPERATURA DO FLUIDO EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO ANGULAR OBTIDO POR PONTE E REIRE(15)

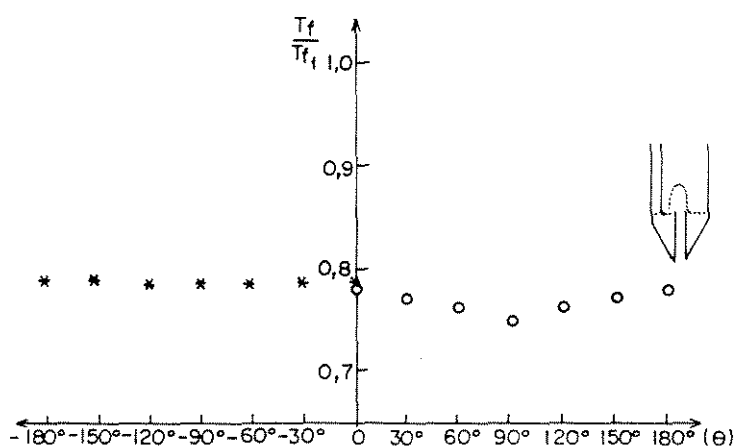


FIGURA 2.19 - TEMPERATURA DO FLUIDO EM FUNÇÃO DA POSIÇÃO ANGULAR PARA A COLUNA COM TUBO INTERNO OBTIDO POR PONTE E FREIRE (15).

A tabela 2.1 apresenta a comparação dos coeficientes de troca térmica obtidos por PONTE e FREIRE (15) e UEMAKI e KUGO (6), sendo evidentes as diferenças já que os sistemas e definições utilizados foram diferentes.

TABELA 2.1 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS POR PONTE E FREIRE (15) COM OS VALORES OBTIDOS POR UEMAKI E KUGO (6).

V_S (g/min)	V_F (g/min)	h_p^a (cal.s ⁻¹ .cm ⁻² .°C ⁻¹)	h_p^j (cal.s ⁻¹ .cm ⁻² .°C ⁻¹)	h_{uk}^j (cal.s ⁻¹ .cm ⁻² .°C ⁻¹)
1200	2338,5	0,98	8,29	$2,8 \times 10^{-3}$

2.4 - O LEITO DE JORRO BIDIMENSIONAL

O leito de jorro bidimensional consiste essencialmente de um vaso retangular com paredes planas verticais e uma base inclinada, que assim como no leito convencional permite uma melhor recirculação de partículas, evitando a formação de zonas mortas (figura 2.20). O leito também pode ser operado com placas internas (draft) que disciplinam a circulação das partículas.

Muito pouco tem sido feito na tentativa de esclarecer a transferência de calor em leito de jorro bidimensional. A maioria dos trabalhos concentram-se na fluidodinâmica e no problema de ampliação de escala.

Um estudo da transferência de calor gás-partícula em leito de jorro bidimensional foi realizado por KUDRA et al (4) que utilizaram duas colunas de tamanhos diferentes com e sem placas internas. Como sólido foram utilizadas partículas esféricas de peneira molecular (tipo 13x) de diâmetros entre 1,4 e 3,5 mm.

O fluxo de calor foi calculado pelo método da taxa de secagem constante e a área de troca térmica foi considerada como sendo a área superficial total das partículas presentes no leito. A diferença de temperatura considerada foi a média logarítmica entre as temperaturas de entrada e saída do gás e a temperatura do gás na superfície do sólido.

Os dados experimentais foram correlacionados pela seguinte equação:

$$Nu = 1,975 \cdot Re^{0,64} \cdot (H_0 / dp)^{-1,20} \cdot (H_0 / W)^{0,45} \cdot (s / dp)^{0,26} \quad (2.16)$$

onde W é a largura do leito em metros e s é a distância do início da placa interna à parede da parte inclinada da coluna.

As figuras 2.21 a 2.23 mostram os resultados obtidos por KUDRA et all (4) onde os coeficientes são plotados contra a velocidade do gás, o volume do leito e o adimensional Ho/dp respectivamente. O aumento do coeficiente com o crescimento da velocidade do gás é devido a uma maior turbulência do gás na superfície das partículas, o que aumenta a transferência de calor. A queda do coeficiente com o aumento do volume pode ser atribuída ao aumento da área de troca térmica que foi calculada da seguinte maneira:

$$A = (6 \cdot V / dp) \cdot (1 - \varepsilon) \quad (2.17)$$

onde V é o volume do leito. A mesma explicação é dada para o decréscimo do coeficiente com o aumento de Ho e diminuição de dp .

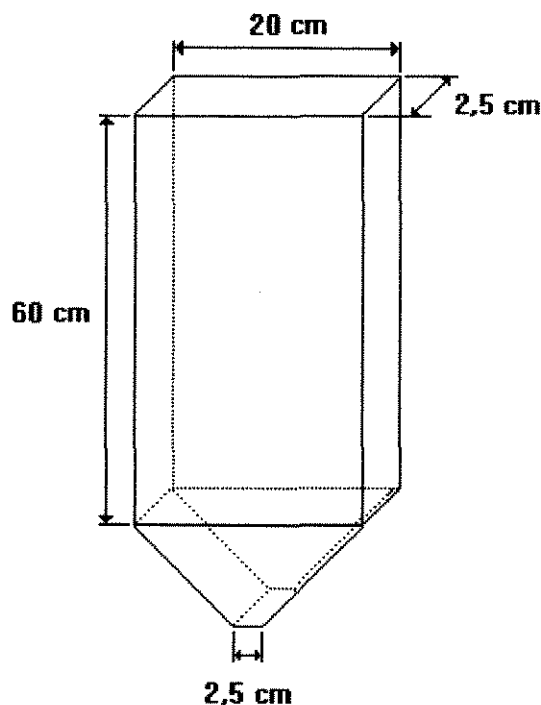


FIGURA 2.20 - O LEITO DE JORRO BIDIMENSIONAL

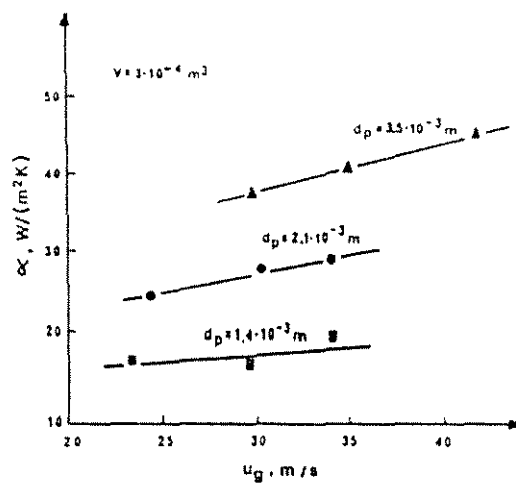


FIGURA 2.21 - COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA OBTIDO POR KUDRA (4) EM FUNÇÃO DA VELOCIDADE DO GÁS.

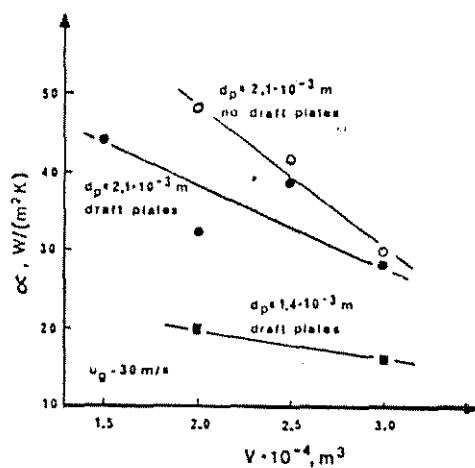


FIGURA 2.22 - COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA OBTIDO POR KUDRA (4) EM FUNÇÃO DO VOLUME DO LEITO.

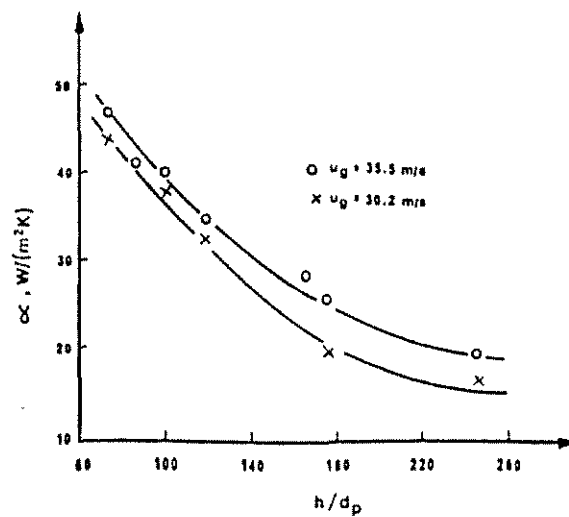


FIGURA 2.23 - COEFICIENTE DE TROCA TÉRMICA OBTIDO POR KUDRA (4) EM FUNÇÃO DO MÓDULO (h/d_p).

CAPÍTULO 3

MONTAGEM E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

O sistema experimental utilizado neste trabalho encontra-se no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem do Departamento de Termofluidodinâmica, onde foi projetado e montado. O sistema - que pode ser usado para trabalhos com leito de jorro e fluidizado - é formado basicamente por um compressor, uma linha de ar com aquecimento, transdutores para medida de pressão, termopares e painel de controle. O equipamento pode ainda ser utilizado em experimentos de recobrimento de partículas, utilizando-se para isso um bico atomizador para aplicação da solução, bomba para levar a solução até o bico e um outro compressor de ar que fornece pressão para o bico atomizador. A figura 3.1 mostra uma visão global da montagem utilizada.

3.1- DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A montagem experimental - cujo esquema é mostrado na figura 3.2 - opera da seguinte maneira : o soprador (1) insufla ar ambiente que passa por um filtro (2), um aquecedor elétrico (4) e por uma placa de orifício (6) - cuja queda de pressão fornece indiretamente, por calibração, a medida da vazão de ar - até chegar ao leito de partículas (9), onde vai promover o jorro e transferir calor para as partículas. Existe uma válvula (3) na saída do soprador que permite a regulação do fluxo de ar.

A variação da temperatura é conseguida através de um variador de voltagem (5) ligado ao aquecedor elétrico. As medidas de temperatura são realizadas com termopares do tipo T de cobre-constantan (7). As medidas de queda de pressão são obtidas com transdutores de pressão previamente calibrados com manômetros de tubo em U (8). Na entrada do leito existe um retificador de fluxo (10) que serve para uniformizar a corrente de gás que entra no leito. A tubulação de aço carbono (11) é isolada com lã de vidro e revestida com alumínio corrugado.

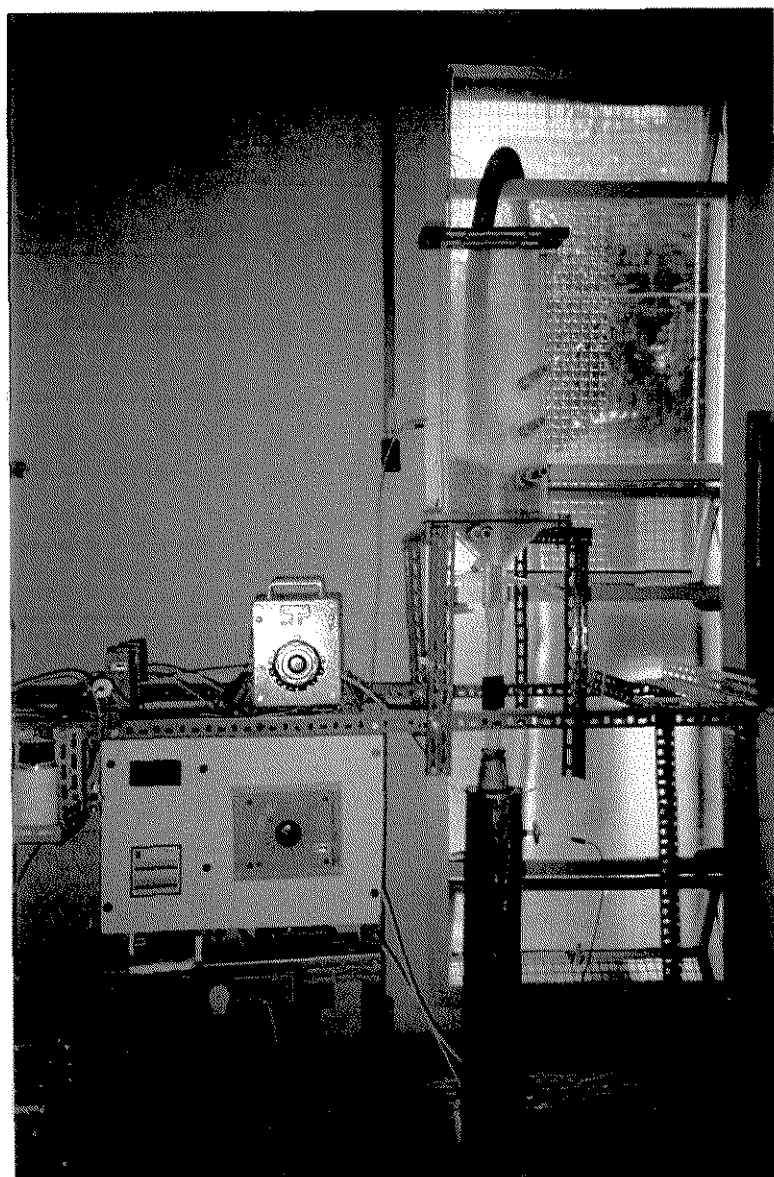
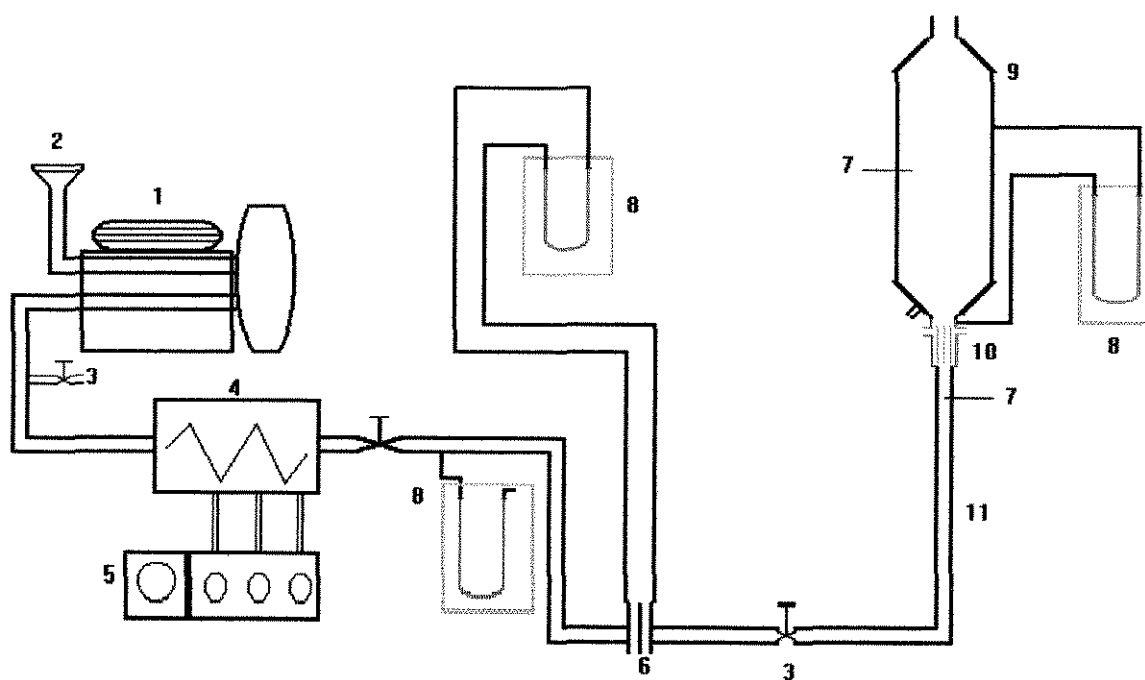


FIGURA 3.1 - A MONTAGEM EXPERIMENTAL



- 1 - SOPRADOR
- 2 - FILTRO
- 3 - VÁLVULA
- 4 - AQUECEDOR ELÉTRICO
- 5 - VARIADOR DE VOLTAGEM
- 6 - PLACA DE ORIFÍCIO
- 7 - TERMOPARES
- 8 - MANÔMETROS
- 9 - LEITO DE PARTÍCULAS
- 10 - RETIFICADOR DE FLUXO
- 11 - TUBULAÇÃO

FIGURA 3.2 - ESQUEMA DA MONTAGEM EXPERIMENTAL

3.1.1- O LEITO DE JORRO BIDIMENSIONAL

O leito onde foram realizadas as corridas foi projetado e construído no Laboratório de Fluidodinâmica e Secagem. O material usado na construção do leito foi o acrílico, para que se pudesse ter uma boa visualização da aerodinâmica em seu interior. A figura 3.3 mostra um esquema da coluna.

As dimensões da coluna foram escolhidas segundo recomendações fornecidas no trabalho de KALWAR et al (16), que estudaram a aerodinâmica de grãos em um leito bidimensional com placas internas. Segundo os autores, a largura da entrada de ar deve estar entre $1/6$ e $1/20$ da largura da coluna para que se obtenha uma boa circulação de sólidos e não se tenha problemas com a ampliação de escala.

Definidas as larguras da coluna e de entrada de ar, foi feito um cálculo das alturas ocupadas por diversas massas de partículas e definiu-se a altura da coluna. Dessa maneira, a coluna foi construída com uma largura de 20 cm, largura de entrada de ar de 2,5 cm (relação de $1/8$) e altura de 60 cm.

Através da observação do comportamento das partículas no leito, optou-se pela utilização de placas internas ("draft plates"), que servem para disciplinar a circulação de sólidos no leito de jorro. Sem a utilização das placas internas e com partículas de 2 e 3 mm de diâmetro, não conseguia-se trabalhar com alturas muito superiores à altura da parte inclinada da coluna, pois o jorro tornava-se instável. Consequia-se no máximo uma altura de 5 cm acima da parte inclinada. As placas internas também foram feitas de acrílico e presas à coluna por pequenos parafusos de ferro. O tamanho das placas variou de acordo com a altura do leito de partículas e foram construídas em 15, 20 e 25 cm.

A distância do fundo do leito ao início das placas internas - também conhecida como distância de separação - foi escolhida como sendo duas vezes a largura da entrada de ar do leito. Foram realizados testes com outras distâncias de separação, sempre em função do comprimento da entrada de ar (multiplicado pelos fatores 1 e 1,5). A escolha baseou-se na observação de uma distância que permitiria uma boa circulação de sólidos.

A parte inclinada da coluna também foi construída de acrílico e com ângulos de 30° , 45° e 60° , que são presos a parte retangular por parafusos de ferro. Esse tipo de montagem permitiu o estudo da influência do ângulo da base inclinada, o qual influencia a circulação de sólidos, no valor do coeficiente de transferência de calor gás-partícula. As figuras 3.4 a 3.6 mostram a parte retangular e as partes inclinadas da coluna, assim como o leito de jorro bidimensional e o leito de jorro.

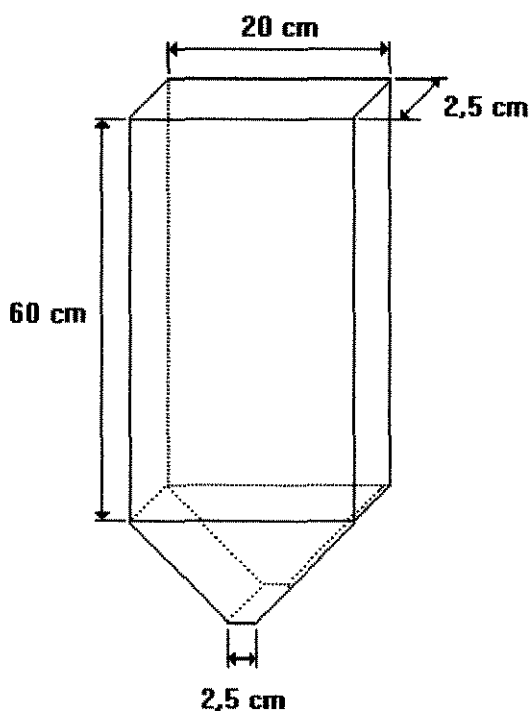


FIGURA 3.3 - ESQUEMA DO LEITO DE JORRO BIDIMENSIONAL

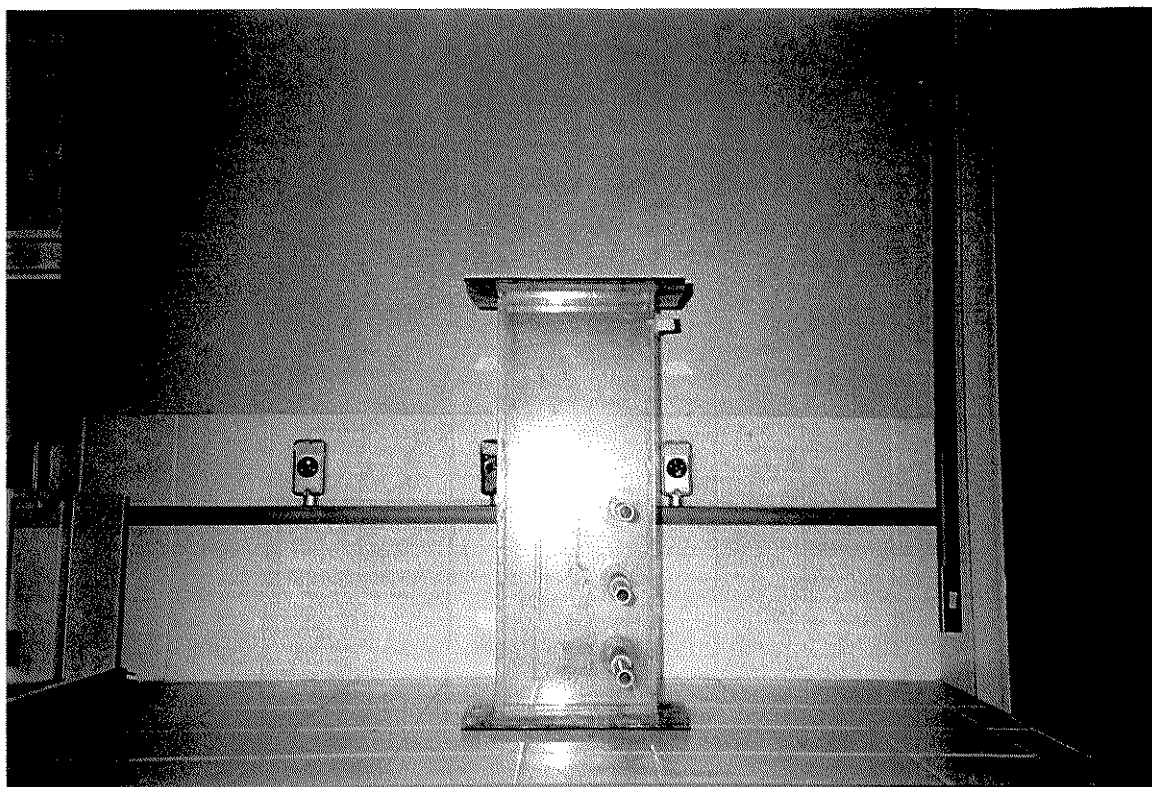


FIGURA 3.4 - PARTE RETANGULAR DO LEITO DE JORRO

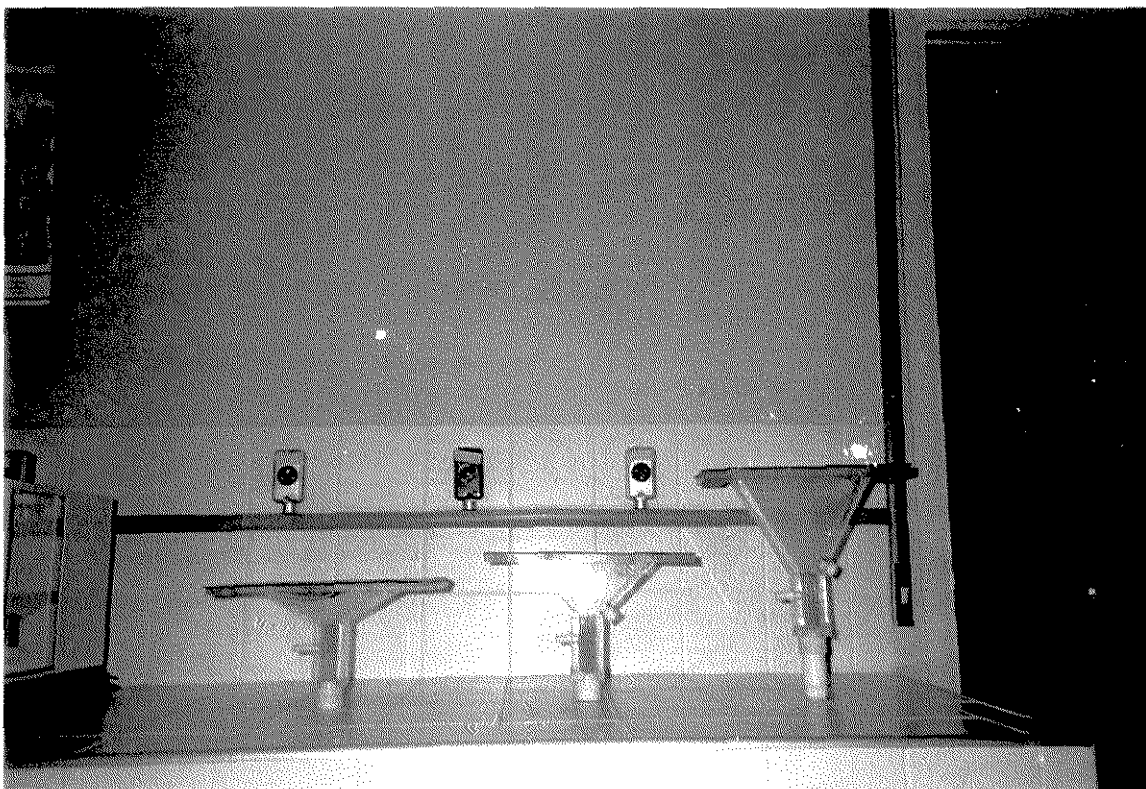


FIGURA 3.5 - ÂNGULOS DO LEITO DE JORRO (30° , 45° , 60°)

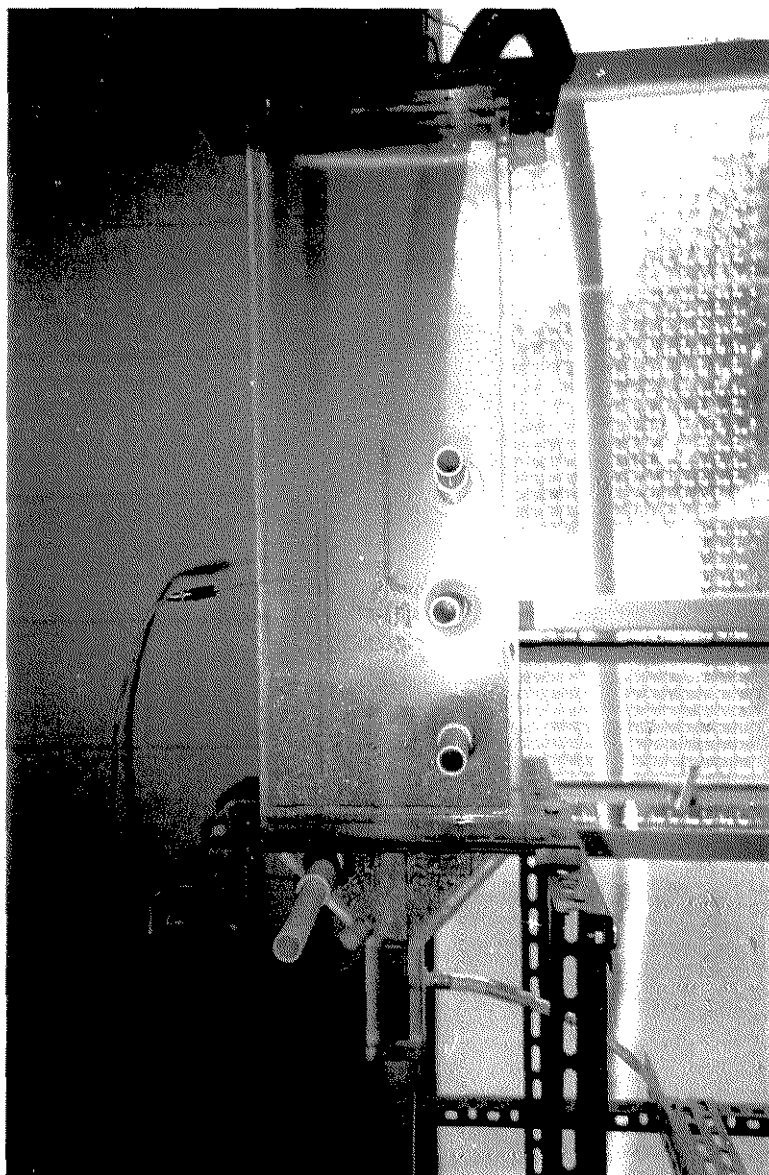


FIGURA 3.6 - O LEITO DE JORRO BIDIMENSIONAL

3.1.2 - CIRCULAÇÃO E CONTROLE DE VAZÃO DE AR - MEDIÇÃO DE QUEDA DE PRESSÃO

O fluxo de ar utilizado na montagem experimental é fornecido por um compressor com motor de 7,5 c.v., deslocamento de 8 m³/min e pressão máxima de 3700 mmca. A tubulação utilizada é de ferro galvanizado com duas polegadas de diâmetro interno, sendo isolada termicamente com duas camadas de lã de vidro e folhas de alumínio corrugado. O controle da vazão é feito através de válvula globo colocada na descarga do compressor. O aquecimento do ar é feito por uma caixa com três resistências que podem ser acionadas separadamente. O controle da tensão nas resistências é feito por um variador de voltagem da marca Variac, que fornece uma tensão de saída de 0 a 240 volts e potência de 1,5 KW.

A medida da vazão de ar na tubulação é feita através de uma placa de orifício concêntrico de arestas quadradas, cujo diâmetro interno é de 39 mm. A queda de pressão na placa é medida por um transdutor de pressão diferencial, que apresenta um limite máximo de pressão de 1,5 PSI e que foi previamente calibrado por um manômetro de tubo em U. A seguinte equação desenvolvida por TARANTO (17) fornece a vazão de ar na tubulação em função da queda de pressão na placa de orifício, em Kg/s:

$$M = 13,40 \cdot (P / (t_a + 273))^{1/2} - 5,15 \cdot (P^{3/2} / (P_e + 1000) \cdot (t + 273)^{1/2}) \quad (3.1)$$

onde P é o valor da queda de pressão na placa em cmH₂O, P_e é a pressão estática na tubulação em cmca e t_a é a temperatura do ar em graus Celsius.

A queda de pressão ao longo do leito e a pressão estática na tubulação também são medidas por transdutores calibrados por manômetros de tubo em U. As seguintes

equações representam as curvas de calibração para a placa de orifício, queda de pressão no leito e pressão estática:

- PLACA DE ORIFÍCIO

$$P(\text{cmH}_2\text{O})=1,188 \cdot Pt(\text{mV})-0,547 \quad (3.2)$$

- QUEDA DE PRESSÃO NO LEITO

$$P_L(\text{cmH}_2\text{O})=1,055 \cdot Pt(\text{mV})-0,346 \quad (3.3)$$

- PRESSÃO ESTÁTICA NA LINHA

$$P_e(\text{cmH}_2\text{O})=15,324 \cdot Pt(\text{mV})-799,011 \quad (3.4)$$

onde P, P_L e P_e em cmH₂O são quedas de pressão em centímetros de coluna de água e Pt (mV) é a leitura do transdutor no indicador do painel em milivolts.

3.1.3 - MEDIÇÃO DE TEMPERATURA

As medidas de temperatura do ar e das partículas foram realizadas com termopares do tipo T de cobre-constantan com isolamento mineral, que cobrem uma faixa de temperatura de 0 a 400 °C. A calibração dos termopares foi feita com termômetro de mercúrio no aquecimento de glicerina.

A figura 3.7 mostra os pontos onde foram colocados os termopares e portanto feitas as medidas as temperaturas do ar na coluna. A temperatura de entrada do gás foi medida por um termopar colocado no centro da tubulação à entrada da coluna e as temperaturas de saída foram medidas por um termopar colocado na lateral da coluna que podia se mover sobre as regiões de jorro e anular.

Um coletor de amostras colocado próximo a fonte - acima de um dos lados da região anular - foi usado para coletar amostras de partículas do jorro que eram imediatamente colocadas em um tubo de ensaio termicamente isolado com lã de vidro e isopor, onde era feita a leitura da temperatura com um termopar. As partículas da região anular eram recolhidas em uma pequena garrafa térmica, onde era feita a leitura da temperatura com um termopar. A figura 3.7 também mostra os locais de coleta de partículas para medição de temperatura.

As temperaturas ao longo de uma das placas internas foram medidas por termopares fixados junto a placa, do lado do jorro e da região anular. Para o cálculo do calor perdido para o ambiente, as temperaturas da superfície externa da coluna foram medidas por um termopar de contato em diversos pontos da região de jorro e anular.

3.1.4 - CARACTERIZAÇÃO DAS PARTÍCULAS

As partículas utilizadas no trabalho foram esferas de vidro de 2 e 3 mm de diâmetro, com massa específica de 2650 Kg/m^3 . Esses diâmetros atingem a faixa de tamanho em que o leito fluidizado tem a sua fluidodinâmica comprometida. Foram escolhidas esferas porque apresentam uma boa circulação no equipamento, formando um jorro de comportamento estável.

Para o cálculo da área de troca térmica tanto na região de jorro quanto na região anular, é necessária a determinação da área específica das partículas. Essa área, quando multiplicada pelo volume da região anular ou de jorro, fornece o volume de sólidos na região. As áreas específicas das partículas foram determinadas pelas seguintes equações:

- REGIÃO DE JORRO

$$ap_j = 6 \cdot (1 - \epsilon_j) / dp \quad (3.5)$$

REGIÃO ANULAR,

$$ap_a = 6 \cdot (1 - \epsilon_a) / dp \quad (3.6)$$

A porosidade da região anular (ϵ_a) foi considerada como sendo 0,4, que é um valor comum usado para um leito empacotado de esferas (1). Na região de jorro foi atribuído o valor de 0,98 para a porosidade, que é um valor normalmente encontrado em sistemas de transporte pneumático em fase diluída. Nas equações acima, dp significa o diâmetro das partículas. A tabela 3.1 mostra o valor da área específica para cada região e diâmetro de partícula.

TABELA 3.1 - ÁREA ESPECÍFICA DAS PARTÍCULAS

Diâmetro das partículas (mm)	2	3
Área específica na região de jorro (m^{-1})	60	40
Área específica na região de anular (m^{-1})	1800	1200

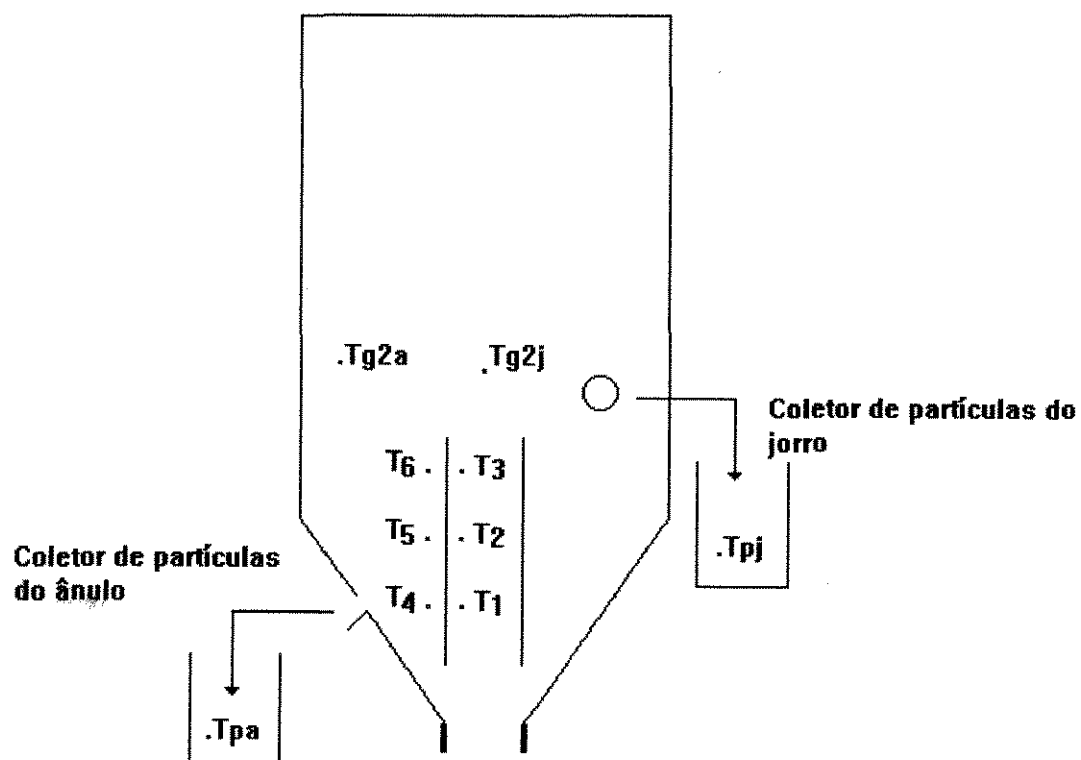


FIGURA 3.7 - ESQUEMA DA COLUNA MOSTRANDO OS LOCAIS DE MEDIDA DE TEMPERATURA E COLETA DE PARTÍCULAS.

3.2 - BALANÇO DE ENERGIA PARA OBTENÇÃO DOS COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA

A equação (2.16) é a única expressão encontrada na literatura para a transferência de calor gás-partícula em leito de jorro bidimensional. Essa equação entretanto, não distingue a região de jorro da região anular e é aplicada para o cálculo de um coeficiente global envolvendo todo o leito.

No presente trabalho, optou-se por tratar o leito de jorro como sendo formado por duas regiões bem distintas no que diz respeito à transferência de calor gás-partícula. Portanto foram feitos balanços de energia separadamente para a região de jorro e anular e foram calculados coeficientes específicos para cada região. Cabe aqui lembrar que a fonte foi considerada como parte integrante da região de jorro no tocante à transferência de calor.

3.2.1 - BALANÇO DE ENERGIA PARA A REGIÃO DE JORRO

A figura 3.8 mostra um esquema do balanço de energia para a região de jorro. O ar quente alimentado cede calor para as partículas presentes na região de jorro para os dois lados da região anular e também perde calor para o ambiente. Portanto, o coeficiente de transferência de calor gás-partícula na região de jorro pode ser calculado pela equação:

$$\dot{M}_j \cdot C_{pj} \cdot (T_{g1} - T_{g2j}) = h_j \cdot a_{pj} \cdot V_j \cdot (T_{gj} - T_{pj}) + 2 \cdot Q_{ja} + \text{perdas} \quad (3.7)$$

O lado esquerdo da equação (3.7) representa o calor transferido pelo o ar quente, onde:

\dot{M}_j = vazão de ar na região de jorro;

C_{pj} = capacidade térmica do gás na temperatura da região de jorro;

T_{g1} = temperatura de entrada do gás;

T_{g2j} = temperatura de saída do gás acima da região de jorro.

A primeira parcela do lado direito da equação representa o calor cedido para as partículas, onde:

h_j = coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula na região de jorro;

a_{pj} = área específica das partículas na região de jorro (equação 3.5);

V_j = volume da região de jorro:

$$V_j = d^2 \cdot H_j \quad (3.8)$$

H_j = altura do jorro;

d^2 = área da seção transversal do jorro;

T_{gj} = temperatura média do gás na região de jorro:

$$T_{gj} = (T_{g1} + T_{g2j}) / 2 \quad (3.9)$$

T_{pj} = temperatura das partículas na região de jorro.

A segunda parcela do lado direito da equação representa o calor cedido para os dois lados da região anular, onde:

Q_{ja} = calor cedido pela região de jorro para um lado da região anular:

$$Q_{ja} = h_{ja} \cdot (A_{ja} / 2) \cdot (T_{gj} - T_{wj}) \quad (3.10)$$

h_{ja} = coeficiente de transferência de calor da região de jorro para a região anular;

T_{wj} = temperatura média ao longo das placas internas pelo lado do jorro (figura 3.9);

A_{ja} = área através da qual ocorre a transferência de calor da região de jorro para a região anular. Foi considerada como a área lateral das placas internas:

$$A_{ja} = 2 \cdot H \cdot d \quad (3.11)$$

O coeficiente de transferência de calor da região de jorro para a região anular foi calculado por um balanço térmico em uma das placas internas (figura 3.9):

$$h_{ja} \cdot H \cdot d \cdot (T_{gj} - T_{wj}) = k_w \cdot (H \cdot d / L) \cdot (T_{wj} - T_{wa}) \quad (3.12)$$

onde:

k_w = condutividade da placa interna (acrílico);

L = espessura da placa interna;

T_{wa} = temperatura média ao longo das placas internas pelo lado da região anular (figura 3.9).

O calor perdido para o ambiente na região de jorro foi calculado pela equação da transferência de calor convectivo, cujo coeficiente foi fornecido pela equação de SCHMIDT e BECKMANN (18) para a convecção natural em placa plana vertical no regime laminar:

$$Nu = h \cdot L / k = 0,480 \cdot (Gr_L)^{1/4} \quad (3.13)$$

onde:

h = coeficiente de transferência de calor médio na placa;

L = comprimento da placa;

k = condutividade do ar;

$Gr_L = \rho^2 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3 / \mu^2$ = número de Grasshof

A combinação $\rho^2 \cdot g \cdot \beta / \mu^2$ é fornecida em tabelas para diferentes tipos de meios (gases, líquidos e metais líquidos) em função da temperatura do meio. A temperatura da superfície T_s foi medida com um termopar de contato.

TABELA 3.2 - VOLUME DA REGIÃO ANULAR PARA AS DIVERSAS BASES DA COLUNA (CM³)

<div>ângulo da base</div> <div>Ho (cm)</div>	30°	45°	60°
13	266,2	215,7	151,88
18	376,2	316,9	253,1
23	486,2	418,2	354,4

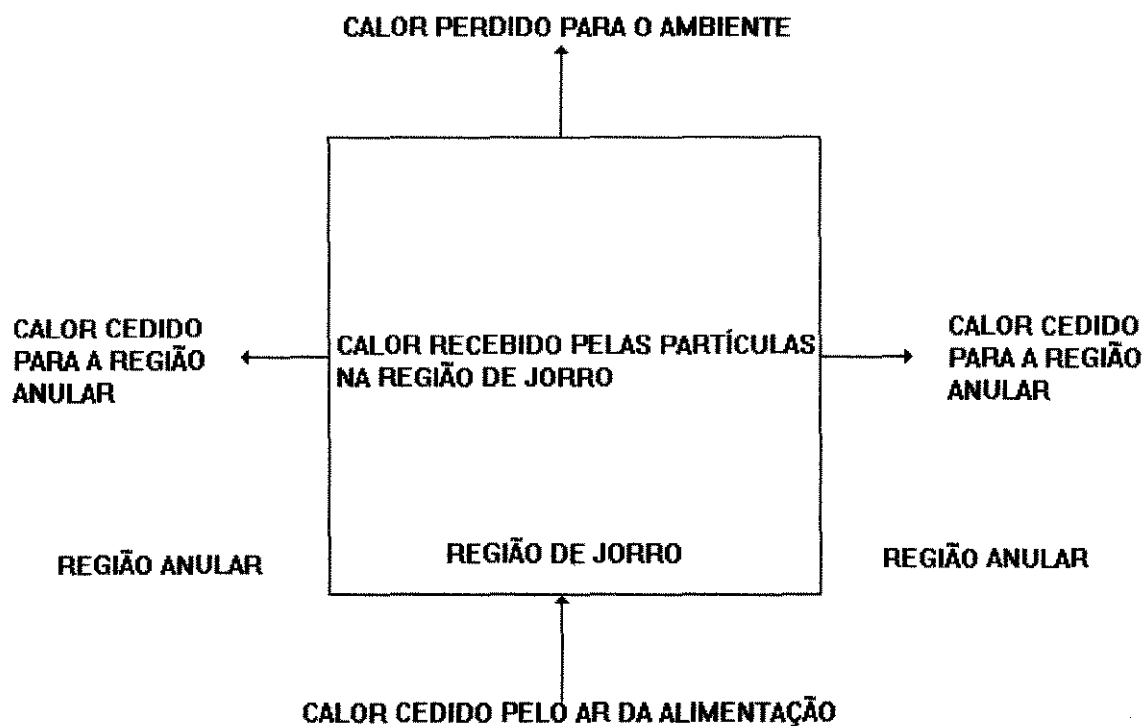


FIGURA 3.8 - BALANÇO DE ENERGIA NA REGIÃO DE JORRO

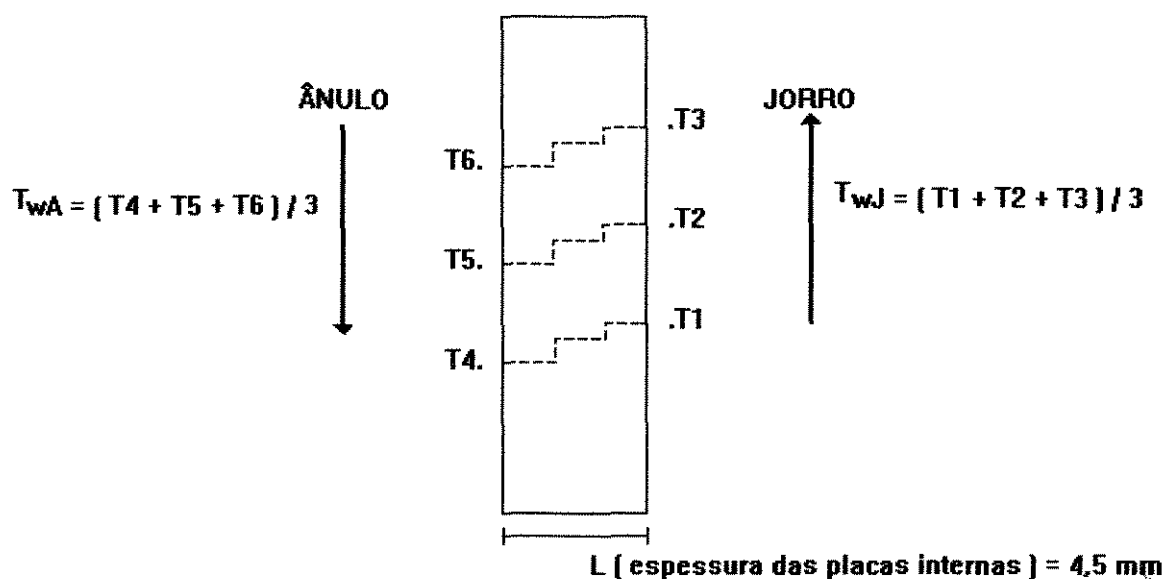


FIGURA 3.9 - ESQUEMA MOSTRANDO A CONDUÇÃO NAS PLACAS INTERNAS

3.2.2 - BALANÇO DE ENERGIA PARA A REGIÃO ANULAR

A figura 3.10 mostra um esquema do balanço de energia para a região anular. A região anular recebe calor do ar da alimentação, da região de jorro, e cede calor para o ambiente. Portanto, o coeficiente de transferência de calor gás-partícula na região anular é calculado pela seguinte equação:

$$\dot{M}_a \cdot C_{p_a} \cdot (T_{g1} - T_{g2a}) + Q_{ja} = h_a \cdot a_{pa} \cdot V_a \cdot (T_{g_a} - T_{p_a}) + \text{perdas} \quad (3.14)$$

A primeira parcela do lado esquerdo da equação (3.14) representa o calor que é cedido pelo ar quente percolando através da região anular, onde:

\dot{M}_a = vazão de ar na região anular.

C_{p_a} = capacidade térmica do gás na temperatura da região anular.

T_{g2a} = temperatura de saída do gás acima da região anular.

A segunda parcela do lado esquerdo da equação representa o calor cedido da região de jorro para a região anular (equação 3.10).

A primeira parcela do lado direito da equação representa o calor cedido para as partículas, onde:

h_a = coeficiente convectivo de transferência de calor gás-partícula na região anular;

a_{pa} = área específica das partículas na região anular (equação 3.6);

V_a = volume da região anular, que é diferente para cada ângulo da base inclinada (tabela 3.2).

T_{g_a} = temperatura média do gás na região anular:

$$T_{g_a} = (T_{g1} + T_{g2a}) / 2 \quad (3.15)$$

T_{p_a} = temperatura das partículas na região anular.

O calor perdido para o ambiente na região anular também foi calculado pela equação 3.13.

A velocidade do ar na região anular foi estimada através de uma forma modificada da equação de MAMURO e HATTORI (19), apresentada na modelagem de um leito de jorro feita por STOCKER et al (20) e que é válida quando a altura da região anular é menor do que a altura máxima de jorro estável:

$$u_a = u_{mf} \cdot [1 - (1 - H_a / H_m)] \quad (3.16)$$

onde:

u_a = velocidade do ar na região anular;

u_{mf} = velocidade mínima de fluidização;

H_a = altura da região anular;

H_m = altura máxima de jorro estável.

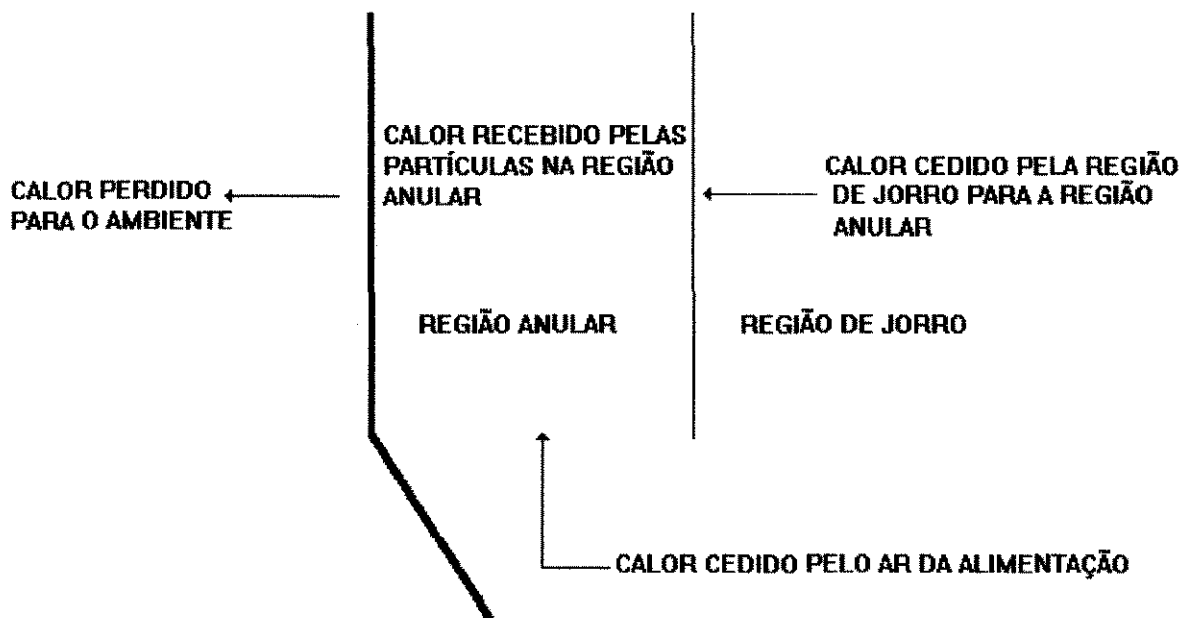


FIGURA 3.10 - BALANÇO DE ENERGIA NA REGIÃO ANULAR

A velocidade mínima de fluidização foi calculada através da modificação da equação de ERGUN (21), com a porosidade de mínima fluidização igual a porosidade na região anular e as propriedades do fluido sendo tomadas à temperatura da região anular:

$$u_{mf} = [(33,7^2 + 0,0408 \cdot Ar)^{1/2} - 33,7] \cdot \mu_g / (\rho_g \cdot dp) \quad (3.17)$$

onde Ar é o número de Arquimedes, ρ_g é a densidade do gás, μ_g é a viscosidade dinâmica do gás e dp é o diâmetro das partículas. A altura máxima de jorro estável foi obtida experimentalmente através de medidas feitas no próprio leito.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E ANÁLISE DOS DADOS EXPERIMENTAIS

O objetivo principal deste trabalho foi a verificação da influência da altura do leito estático, diâmetro das partículas, temperatura de entrada do gás e ângulo da base cônica no coeficiente de transferência de calor gás-partícula, calculado separadamente para as regiões de jorro e anular. Com esse objetivo foi feito um planejamento fatorial de experimentos no qual determinou-se os níveis das variáveis, ou seja, os valores para cada uma delas. A tabela 4.1 mostra os valores assumidos para cada variável.

Segundo a descrição encontrada em BOX, HUNTER & HUNTER (22), para realizar um planejamento fatorial seleciona-se um número fixo de “níveis” para cada uma de um número de variáveis escolhidas e então realiza-se experimentos com todas as combinações possíveis. Se há N_1 níveis para a primeira variável, N_2 para a segunda e N_K para a variável de ordem k , então o planejamento requer $N_1 \times N_2 \times \dots \times N_K$ corridas.

TABELA 4.1 - VALORES DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS NO PLANEJAMENTO FATORIAL DE EXPERIMENTOS. O SINAL (-) INDICA O MENOR VALOR E O SINAL (+) INDICA O MAIOR VALOR.

NÍVEIS	(-)	(+)
ALTURA DO LEITO ESTÁTICO (cm)	13	18
TEMPERATURA DE ENTRADA DO GÁS (°C)	75	85
DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS (mm)	2	3
ÂNGULO DA BASE CÔNICA	45	60

A escolha de quatro variáveis com dois valores para cada uma implica em um planejamento fatorial 2^4 que resulta em 16 experimentos. A partir dos resultados

obtidos nos dezesseis experimentos, foi feita uma análise estatística do efeito de cada variável no coeficiente de transferência de calor gás-partícula, seguindo a metodologia do planejamento fatorial de experimentos.

Posteriormente foram realizados experimentos com outros valores para as variáveis, com o objetivo de plotar os resultados em gráficos e estabelecer correlações para o número de Nusselt das regiões anular e de jorro.

4.1 - RESULTADOS OBTIDOS

Seguindo a metodologia descrita no capítulo 3, calculou-se os coeficientes de transferência de calor gás-partícula nas regiões de jorro e anular para as diversas condições estipuladas. A tabela 4.2 mostra os valores medidos de algumas variáveis importantes no cálculo dos coeficientes. Cabe lembrar que a vazão de gás na região anular foi calculada através da determinação da velocidade do gás na região utilizando para tal o modelo de MAMURO e HATTORI (19). Subtraindo-se essa vazão da vazão total de ar medida que entra no leito, obtém-se a vazão de ar na região de jorro.

As tabelas 4.3 a 4.6 mostram os valores dos coeficientes de transferência de calor gás-partícula calculados na região de jorro e anular para todos os valores das variáveis, incluindo aqueles que não entraram no planejamento fatorial ($H_o = 23$ cm e $T_{GI} = 65$ °C).

No decorrer do trabalho, também foi utilizada uma base cônica com ângulo de 30°. Os resultados obtidos para este ângulo não foram apresentados porque o mesmo não apresentou uma boa circulação de sólidos, havendo formação de zonas mortas nas laterais do leito, como mostra a figura 4.1. Com a formação de zonas mortas, a quantidade de sólidos efetivamente em circulação é menor do que a quantidade presente no leito, o que mascara os valores dos coeficientes obtidos.

O tempo de duração de cada corrida foi fixado em 30 minutos, que era suficiente para que o sistema entrasse em equilíbrio. Esse tempo foi estipulado através da observação da variação da temperatura das partículas com o tempo para diversas condições de operação. A figura 4.2 mostra um exemplo do comportamento da temperatura das partículas em uma corrida.

TABELA 4.2 - VALORES EXPERIMENTAIS DA VAZÃO DE GÁS NA REGIÃO DE JORRO (\dot{M}_J) E ANULAR (\dot{M}_A), TEMPERATURA DE SAÍDA DO GÁS NA REGIÃO DE JORRO (T_{G2J}) E ANULAR (T_{G2A}), TEMPERATURA DAS PARTÍCULAS NA REGIÃO DE JORRO (T_{PJ}) E ANULAR (T_{PA}).

Ho	Tg1	dp	α	Mj	MA	T _{G2J}	T _{G2A}	TpJ	TpA
18	75	2	45	23,58	5,66	69,6	66,1	68,8	67,7
			60	22,09	5,24	69,5	65,9	66,9	66,4
		3	45	28,90	7,09	70,8	66,3	67,5	66,6
			60	27,55	6,92	70,6	65,6	67,1	65,7
	85	2	45	23,27	5,56	77,9	74,5	77,2	76,1
			60	21,65	5,14	78,5	73,9	76,8	75,4
		3	45	28,49	6,99	79,5	74,7	76,0	75,0
			60	26,8	6,75	79,8	73,4	74,9	74,2
23	75	2	45	23,51	6,53	68,1	65,0	68,0	68,1
			60	22,09	6,37	68,7	65,2	67,8	67,0
		3	45	27,57	8,39	70,2	65,7	67,0	66,9
			60	27,73	8,26	69,9	65,0	66,4	65,9
	85	2	45	22,57	6,25	77,0	73,4	75,9	74,9
			60	20,99	5,97	77,5	72,5	75,4	74,1
		3	45	27,35	8,14	78,6	73,6	74,5	73,7
			60	27,53	7,98	78,8	73,2	73,8	72,6

TABELA 4.3 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA NA REGIÃO DE JORRO PARA O ÂNGULO DE 45°.

T _{g1} (°C)	H _o (cm)	dp (mm)	h (Kcal/h.m ² .°C)
65	13	2	1304,8
		3	2012,6
	18	2	1043,7
		3	1557,9
	23	2	901,0
		3	1364,4
75	13	2	1225,4
		3	1368,6
	18	2	1006,2
		3	1036,5
	23	2	897,0
		3	936,0
85	13	2	1286,8
		3	1519,8
	18	2	944,2
		3	1068,3
	23	2	849,0
		3	975,4

TABELA 4.4 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA NA REGIÃO ANULAR PARA O ÂNGULO DE 45°.

Tg1 (°C)	Ho (cm)	dp (mm)	h (Kcal/h.m ² .°C)
65	13	2	7,2
		3	12,9
	18	2	5,5
		3	10,6
	23	2	3,7
		3	7,0
75	13	2	9,3
		3	12,7
	18	2	7,5
		3	11,6
	23	2	5,3
		3	8,5
85	13	2	8,9
		3	13,2
	18	2	6,4
		3	9,4
	23	2	4,9
		3	7,3

TABELA 4.5 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA NA REGIÃO DE JORRO PARA O ÂNGULO DE 60°.

Tg1 (°C)	Ho (cm)	dp (mm)	h (Kcal/h.m ² .°C)
65	13	2	1108,9
		3	1543,6
	18	2	930,6
		3	1360,4
	23	2	761,5
		3	1165,1
75	13	2	923,9
		3	1313,6
	18	2	848,4
		3	958,0
	23	2	758,0
		3	871,5
85	13	2	945,3
		3	1108,3
	18	2	820,7
		3	982,1
	23	2	715,1
		3	890,2

TABELA 4.6 - COEFICIENTES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA NA REGIÃO ANULAR PARA O ÂNGULO DE 60°.

Tg ₁ (°C)	Ho (cm)	dp (mm)	h (Kcal/h.m ² .°C)
65	13	2	7,6
		3	15,6
	18	2	6,1
		3	12,8
	23	2	4,8
		3	9,6
75	13	2	9,7
		3	16,6
	18	2	7,6
		3	13,5
	23	2	6,1
		3	10,8
85	13	2	9,8
		3	16,6
	18	2	7,4
		3	14,3
	23	2	5,6
		3	9,3

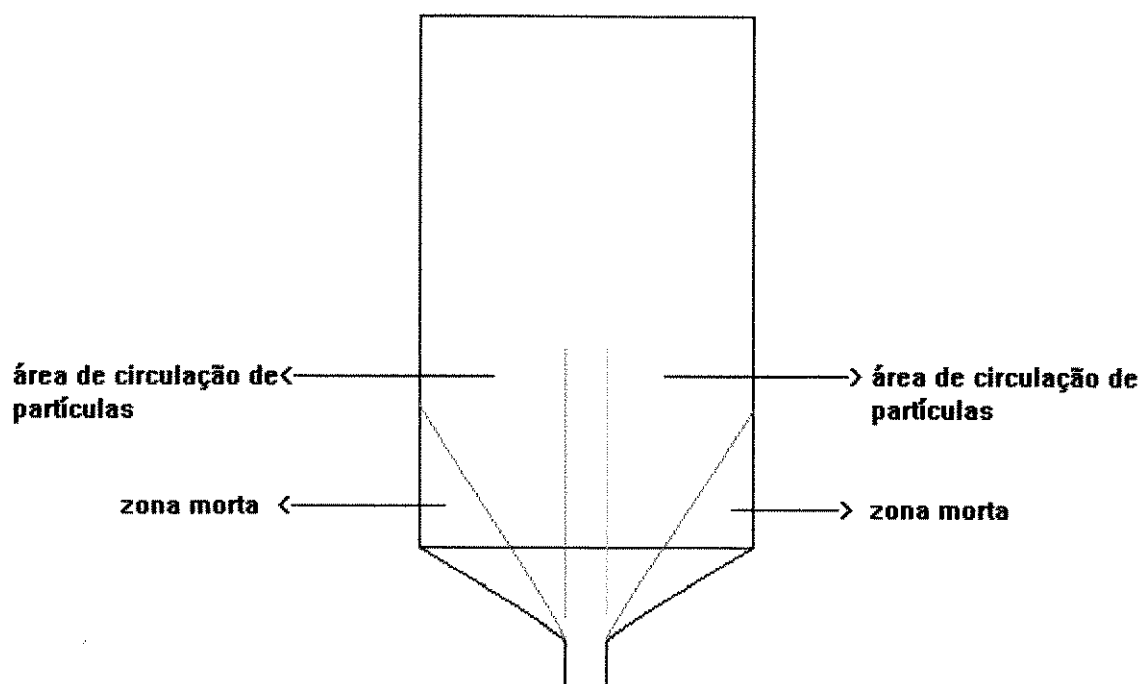


Figura 4.1 - Esquema mostrando as regiões de ocorrência de zonas mortas no leito, utilizando ângulo de 30

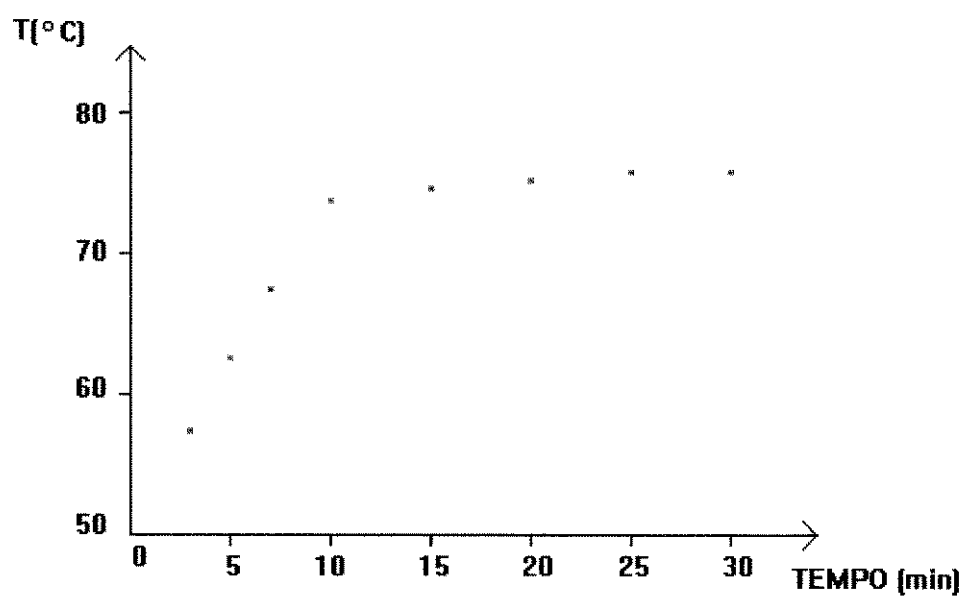


FIGURA 4.2 - DETERMINAÇÃO DO TEMPO DE CORRIDA

4.2 - ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA REGIÃO ANULAR

Utilizando-se o método do planejamento fatorial de experimentos, foi feita uma análise da influência de cada variável estudada no coeficiente de transferência de calor gás-partícula. Esta análise consiste na quantificação dos efeitos de cada variável e na construção de intervalos de confiança para estes efeitos.

4.2.1 - ESTIMATIVA DOS EFEITOS

A estimativa dos efeitos para a região anular foi feita através do algoritmo de Yates, que é um mecanismo mais rápido para fazer a estimativa. A tabela 4.7 mostra o algoritmo para o cálculo dos efeitos. Os sinais (-) e (+) representam os valores das variáveis mostrados na tabela 4.1. As colunas “T”, “H”, “D” e “ α ” representam a temperatura, altura do leito estático, diâmetro das partículas e ângulo da base cônica respectivamente. A coluna “Y” representa os valores dos coeficientes calculados para cada teste, em suas respectivas condições. Por exemplo, o valor 9,3 é o valor do coeficiente para a corrida com temperatura de entrada do gás igual a 75 °C, altura do leito estático de 13 cm, diâmetro das partículas igual a 2 mm e ângulo de 45°. A coluna “ESTIMATIVA DO EFEITO” apresenta os valores estimados para os diversos efeitos da variáveis isoladas e suas interações.

Os efeitos representados pelas letras “T”, “H”, “D” e “ α ” são chamados de efeitos principais e quantificam a influência de cada uma destas variáveis no coeficiente de transferência de calor gás-partícula. Os efeitos representados por duas letras combinadas são os efeitos de segunda ordem e mostram se há interação de uma variável com outra, ou seja, se a influência de uma variável depende da influência da outra. Os efeitos representados por combinações de três e quatro letras são chamados

efeitos de terceira e quarta ordem respectivamente. Em alguns casos esses efeitos podem ser desprezados e utilizados na estimativa do desvio padrão das observações.

TABELA 4.7 - ALGORÍTMO DE YATES PARA O CÁLCULO DOS EFEITOS NA REGIÃO ANULAR

TESTE	T	H	D	α	Y	ESTIMATIVA DO EFEITO	IDENTIFICAÇÃO
1	-	-	-	-	9,3	10,91	MÉDIA
2	+	-	-	-	8,9	-0,313	T
3	-	+	-	-	7,5	-2,39	H
4	+	+	-	-	6,4	-0,363	TH
5	-	-	+	-	12,7	5,16	D
6	+	-	+	-	13,2	0,0875	TD
7	-	+	+	-	11,6	-0,188	HD
8	+	+	+	-	9,4	-0,113	THD
9	-	-	-	+	9,7	2,06	A
10	+	-	-	+	9,8	0,488	TA
11	-	+	-	+	7,6	-0,0875	HA
12	+	+	-	+	7,4	0,488	THA
13	-	-	+	+	16,6	1,46	DA
14	+	-	+	+	16,6	0,138	TDA
15	-	+	+	+	13,5	-0,0375	HDA
16	+	+	+	+	14,3	0,388	THDA

4.2.2 - ANÁLISE DOS EFEITOS

Antes de proceder à análise dos efeitos, torna-se necessário no momento atual da discussão uma breve exposição de alguns conceitos estatísticos utilizados nesta mesma análise. Essa análise consiste na verificação de quais efeitos são significativos, ou seja, realmente influem no valor do coeficiente de transferência de calor gás-partícula. Para fazer essa verificação utiliza-se um teste estatístico que permite com certa confiança, tirar conclusões a respeito dos efeitos estimados.

Inicialmente deve-se deixar bem claro que do ponto de vista estatístico, um efeito é apenas uma diferença entre médias de duas amostras distintas, ou seja, um efeito é uma estatística do tipo $\bar{Y}_+ - \bar{Y}_-$ onde:

\bar{Y}_+ = média dos coeficientes relacionados ao nível superior (+)

\bar{Y}_- = média dos coeficientes relacionados ao nível inferior (-)

Para verificar se o valor do efeito é ou não indicador de uma influência da variável na resposta, o coeficiente de transferência de calor gás-partícula, utiliza-se o teste estatístico.

Para fazer o teste optou-se pela construção de intervalos de confiança para os efeitos, o que é considerado como o método fundamental para apresentação de evidência obtida a partir de uma amostra.

Seja X_1, X_2, \dots, X_n uma amostra aleatória e θ um parâmetro populacional desconhecido. Um intervalo de confiança para θ é um intervalo (L,U) calculado com base nas observações amostrais X_1, X_2, \dots, X_n e tal que, antes da amostragem, inclua o verdadeiro valor desconhecido de θ com uma probabilidade (alta) especificada. Essa probabilidade, denotada por $(1-\alpha)$ é quase sempre de 0,95 (ou 95%).

Resumindo:

$$P [L < \theta < U] = 1 - \alpha$$

e o intervalo (L,U) é chamado intervalo de $100(1 - \alpha)\%$ de confiança para o parâmetro θ . A probabilidade especificada ($1 - \alpha$) representa a longo prazo a frequência relativa aproximada das vezes em que o parâmetro estará incluído nos intervalos obtidos em amostras repetidas.

No caso em estudo o parâmetro é um efeito qualquer, que é uma diferença de médias e os limites do intervalo são calculados utilizando-se a distribuição “t” de Student:

$$L = \text{efeito estimado} - t_{\alpha/2} \cdot \text{D.P.} \quad (4.1)$$

$$U = \text{efeito estimado} + t_{\alpha/2} \cdot \text{D.P.} \quad (4.2)$$

onde:

$t_{\alpha/2}$ = variável padronizada da distribuição “t”.

D.P. = estimativa do desvio padrão.

Portanto a equação da probabilidade para um efeito qualquer ficaria assim:

$$P[\text{efeito estimado} - t_{\alpha/2} \cdot \text{D.P.} < \text{efeito} < \text{efeito estimado} + t_{\alpha/2} \cdot \text{D.P.}] = 1 - \alpha \quad (4.3)$$

A distribuição “t” é utilizada quando o tamanho da amostra é pequeno. Como regra geral costuma-se considerar pequena uma amostra menor do que 30.

A DISTRIBUIÇÃO “t” DE STUDENT

Se X_1, X_2, \dots, X_n é uma amostra aleatória de uma população normal com média μ e desvio padrão σ e :

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{e} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{N-1}}$$

então a distribuição de

$$t = \frac{\bar{X} - \mu}{s / \sqrt{n}}$$

é chamada distribuição “t” de Student com N-1 graus de liberdade, onde \bar{X} é a média amostral e n é o tamanho da amostra.

A especificação “com N-1 graus de liberdade se faz necessária porque para cada tamanho diferente da amostra, ou do valor (N-1) há uma distribuição “t” diferente. As distribuições “t” são simétricas em relação a zero mas apresentam caudas mais grossas do que a distribuição normal com média zero e variância 1. A figura 4.3 ilustra a curva de densidade de “t” para 5 graus de liberdade.

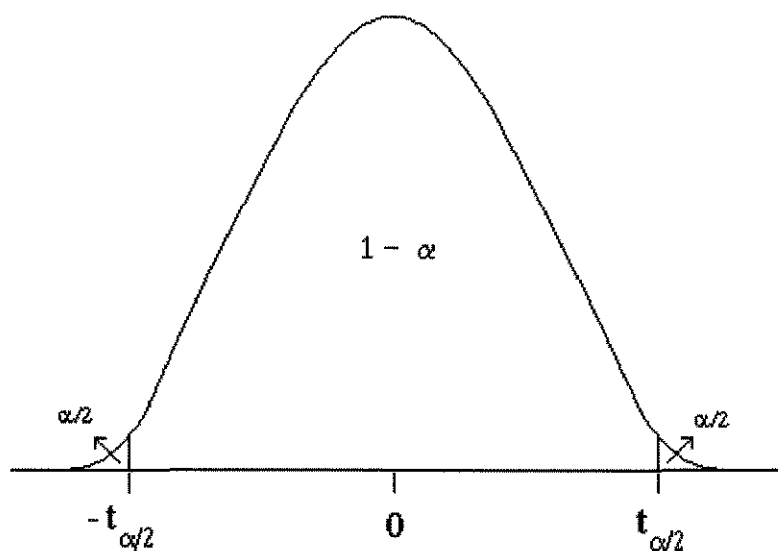


FIGURA 4.3 - DISTRIBUIÇÃO DE STUDENT

O ponto $t_{\alpha/2}$ denota o ponto $\alpha/2$ da distribuição “t” de Student (i.e. a área à direita de $t_{\alpha/2}$ é $\alpha/2$, conforme a figura 4.2). Se um ponto encontra-se na região além de $t_{\alpha/2}$ (ou $-t_{\alpha/2}$), dizemos com certa confiança que este difere da média, que é zero. Então se um efeito encontra-se nesta mesma região, podemos dizer que este efeito difere de zero e portanto pode ser considerado como sendo significativo. Com relação aos intervalos de confiança, equivale a dizer que um efeito será significativo se tal intervalo não passar pelo zero.

O próximo passo na determinação dos intervalos de confiança é a estimativa do desvio padrão. Uma das maneiras de determinar o desvio padrão é fazendo-se duplicatas para cada corrida. Dessa maneira utilizamos a diferença entre os resultados da réplica e estimamos a variância para cada corrida e consequentemente a variância total combinada.

Como não foram feitas réplicas neste trabalho não é possível uma estimativa direta da variância a partir das 16 corridas do planejamento. Entretanto pode-se obter

tal estimativa se forem feitas certas suposições. Assumimos que todas as interações de terceira e quarta ordem são desprezíveis e indicam diferenças que surgiriam principalmente de erro experimental. Portanto os efeitos “THD”, “TH α ”, “TD α ”, “HD α ” e “THD α ” são considerados desprezíveis e são utilizados para a estimativa da variância experimental.

Como já foi visto, um efeito é uma diferença de médias entre dois tratamentos, um representado pelo nível superior da variável (sinal +) e outro representado pelo nível inferior (sinal -). Para estimarmos o desvio padrão, utilizaremos as conclusões da análise da variância para vários tratamentos.

A análise da variância nos diz que a variância combinada dos efeitos pode ser estimada pelo quadrado médio residual que é dado pela seguinte equação:

$$s_E^2 = QM_E = \frac{SQ_E}{v_E} \quad (4.4)$$

s_E^2 = variância combinada dos efeitos

QM_E = quadrado médio residual

SQ_E = somatório de quadrados residuais

v_E = graus de liberdade do resíduo

O somatório de quadrados residuais é obtido pelo somatório dos somatórios dos quadrados dos efeitos considerados desprezíveis:

$$SQ_E = \sum SQ_{\text{efeitos desprezíveis}} \quad (4.5)$$

Finalmente o somatório dos quadrados de um efeito é dado pela equação (4.6):

$$SQ_{\text{efeito}} = \frac{N}{4} \cdot (\text{efeito})^2 \quad (4.6)$$

onde N = número de corridas experimentais. Os graus de liberdade do resíduo são dados pelo número de efeitos desprezíveis que num planejamento fatorial 2^4 é igual a 5.

Visto que cada efeito e interação é uma estatística da forma $\bar{Y}_+ - \bar{Y}_-$, onde cada média contém oito observações, a variância de cada efeito é dada por:

$$V(\text{efeito}) = V(\bar{Y}_+ - \bar{Y}_-) = (1/8 + 1/8) \cdot \sigma^2 \quad (4.7)$$

onde σ^2 é a variância total. Em geral se N corridas são feitas em um planejamento fatorial de dois níveis, temos que:

$$V(\text{efeito}) = \frac{4}{N} \cdot \sigma^2 \quad (4.8)$$

Então o desvio padrão de um efeito é dado por:

$$D.P. = \sqrt{\frac{4}{N} \cdot \sigma^2} \quad (4.9)$$

e utilizamos a variância combinada dos efeitos para estimarmos o valor de σ^2 :

$$D.P. = 2 \cdot \frac{s_E}{\sqrt{N}} \quad (4.10)$$

onde $s_E = \sqrt{QM_E}$. Portanto o intervalo de confiança para um efeito é calculado pela seguinte expressão:

$$I.C. (\text{efeito}, 1-\alpha) = \text{efeito estimado} \pm t_{\alpha/2, v_E} \cdot 2 \cdot \frac{s_E}{\sqrt{N}} \quad (4.11)$$

O somatório de quadrados de um efeito é dado pela equação (4.6):

$$SQ_{\text{efeito}} = 4 \cdot (\text{efeito})^2, \text{ para } N = 16.$$

A tabela 4.9 mostra os efeitos desprezíveis para a região anular, o somatório dos quadrados de cada efeito e o somatório de quadrados residuais. O quadrado médio residual é obtido da equação 4.4:

$$QM_E = 1,6876 / 5 = 0,3375$$

de onde vem que:

$$s_E = \sqrt{QM_E} = 0,5810$$

Para uma probabilidade de 95 %, da tabela da distribuição “t” (20) tiramos $t_{\alpha/2, vE} = t_{5, 0,025} = 2,5706$. Definindo $\Delta = 2 \cdot t_{\alpha/2, vE} \cdot \frac{s_E}{\sqrt{N}}$, temos que $\Delta = 0,7467$ e a equação 4.9

fica:

$$I.C. (efeito, 95 \%) = \text{efeito estimado} \pm 0,7467 \quad (4.12)$$

A tabela 4.10 apresenta os intervalos de confiança para os efeitos da região anular, indicando quais são significativos.

TABELA 4.9 - CÁLCULO DO SOMATÓRIO DE QUADRADOS RESIDUAIS PARA A REGIÃO ANULAR

IDENTIFICAÇÃO	EFEITO	SQ _{EFEITO}
THD	-0,113	0,0511
TH α	0,488	0,9526
TD α	0,138	0,0762
HD α	-0,0375	0,0056
THD α	0,388	0,6022
SQ _E	—	1,6876

TABELA 4.10 - INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA OS EFEITOS NA REGIÃO ANULAR (S = SIGNIFICATIVO, NS = NÃO SIGNIFICATIVO).

IDENTIFICAÇÃO DO EFEITO	INTERVALO DE CONFIANÇA	INDICAÇÃO
α	(1,31 ; 2,81)	S
T	(-1,06 ; 0,43)	NS
H	(-3,14 ; -1,64)	S
D	(4,41 ; 5,91)	S
TH	(-1,11 ; 0,38)	NS
TD	(-0,66 ; 0,83)	NS
HD	(-0,93 ; 0,56)	NS
T α	(-0,26 ; 1,23)	NS
H α	(-0,83 ; 0,66)	NS
D α	(0,71 ; 2,21)	S

Portanto os efeitos significativos são os efeitos principais “H”, “ α ”, “D” e o efeito de segunda ordem “D α ”, mostrando que a influência do diâmetro das partículas depende do ângulo da base cônica utilizada.

O efeito principal de uma variável deve ser interpretado individualmente somente se não houver evidências de que a mesma interage com outras variáveis. Quando há evidências de efeitos de interação, estes devem ser interpretados em conjunto. Portanto de acordo com os resultados obtidos, o efeito “H” (altura do leito estático) deve ser interpretado individualmente e os efeitos “D” (diâmetro das partículas) e “ α ” (ângulo da base cônica) devem ser interpretados em conjunto.

EFEITO H

$H(-)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $H_o = 13$ cm

$H(+)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $H_o = 18$ cm



“O AUMENTO DA ALTURA DO LEITO ESTÁTICO IMPLICA EM UMA DIMINUIÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA DA REGIÃO ANULAR”.

Aumentar a altura do leito estático significa um aumento na carga de partículas e portanto um número maior das mesmas para serem aquecidas. Devido a este fato há um decréscimo do coeficiente de transferência de calor gás-partícula que é definido em função da área de troca térmica.

EFEITO $D\alpha$

$D(-)\alpha(-)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $d_p = 2$ mm e $\alpha = 45^\circ$

$D(-)\alpha(+)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $d_p = 2$ mm e $\alpha = 60^\circ$

$D(+)\alpha(-)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $d_p = 3$ mm e $\alpha = 45^\circ$

$D(+)\alpha(+)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $d_p = 3$ mm e $\alpha = 60^\circ$

	D(-)	D(+)
$\alpha(-)$	8,0	11,7
$\alpha(+)$	8,6	15,3

O AUMENTO DO DIÂMETRO IMPLICA EM UM AUMENTO NO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA NA REGIÃO ANULAR, ENTRETANTO ESTE AUMENTO É MAIS PRONUNCIADO PARA O ÂNGULO DE 60°. PORTANTO O DIÂMETRO DA PARTÍCULA INFLUI MAIS NO COEFICIENTE DA REGIÃO ANULAR QUANDO UTILIZA-SE UMA BASE CÔNICA COM ÂNGULO DE 60°.

Quanto maior o diâmetro das partículas, maior é a velocidade relativa das mesmas em relação ao gás o que aumenta a turbulência na superfície das partículas aumentando portanto a transferência de calor e consequentemente o valor do coeficiente. No ângulo de 60°, a circulação dos sólidos é maior e portanto contribui mais para o aumento no valor do coeficiente.

4.3 - ANÁLISE DOS RESULTADOS PARA A REGIÃO DE JORRO

Para a região de jorro foi seguida a mesma metodologia utilizada na análise dos resultados para a região anular. A estimativa dos efeitos também foi feita utilizando-se o algoritmo de Yates que é mostrado na tabela 4.11.

4.3.1 - ANÁLISE DOS EFEITOS

Toda a discussão teórica sobre alguns conceitos estatísticos que foi vista na análise dos efeitos para a região anular, aplica-se igualmente para a região de jorro e portanto passaremos imediatamente à determinação dos intervalos de confiança para os efeitos nesta região. A tabela 4.12 mostra os efeitos desprezíveis para a região de jorro, o somatório dos quadrados de cada efeito e o somatório de quadrados residuais.

O quadrado médio residual obtido da equação 4.4 é dado por::

$$QM_E = 25351,22 / 5 = 5070,24$$

de onde vem:

$$s_E = \sqrt{QM_E} = 71,21$$

e novamente utiliza-se $\Delta = 2 \cdot t_{\alpha/2, vE} \cdot \frac{s_E}{\sqrt{N}} = 91,52$, com $t_{\alpha/2, vE} = 2,5706$.

Portanto a equação 4.11 fica:

$$IC(\text{efeito}, 95\%) = \text{efeito estimado} \pm 91,52 \quad (4.13)$$

TABELA 4.11 - ALGORÍTMO DE YATES PARA O CÁLCULO DOS EFEITOS NA REGIÃO DE JORRO

TESTE	T	H	D	α	Y	ESTIMATIVA DO EFEITO	IDENTIFICAÇÃO
1	-	-	-	-	1225,4	1084,76	MÉDIA
2	+	-	-	-	1286,8	-0,638	T
3	-	+	-	-	1006,2	-253,41	H
4	+	+	-	-	944,2	7,54	TH
5	-	-	+	-	1368,6	169,29	D
6	+	-	+	-	1519,8	1,09	TD
7	-	+	+	-	1036,5	-62,94	HD
8	+	+	+	-	1068,3	19,96	THD
9	-	-	-	+	923,9	-194,44	α
10	+	-	-	+	945,3	-46,24	T α
11	-	+	-	+	848,4	82,94	H α
12	+	+	-	+	820,7	37,54	TH α
13	-	-	+	+	1313,6	36,64	D α
14	+	-	+	+	1108,3	-44,81	TD α
15	-	+	+	+	958,0	-7,49	HD α
16	+	+	+	+	982,1	49,66	THD α

A tabela 4.13 apresenta os intervalos de confiança para os efeitos de região de jorro, indicando quais são significativos.

TABELA 4.12 - CÁLCULO DO SOMATÓRIO DE QUADRADOS RESIDUAIS PARA A REGIÃO DE JORRO

IDENTIFICAÇÃO	EFEITO	SQ _{EFEITO}
THD	19,96	1593,61
TH α	37,54	5637,01
TD α	-44,81	8031,74
HD α	-7,49	224,4
THD α	49,66	9864,46
SQ _E	—	25351,22

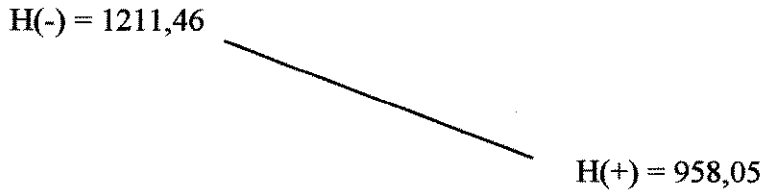
TABELA 4.13 - INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA OS EFEITOS DA REGIÃO DE JORRO (S = SIGNIFICATIVO, NS = NÃO SIGNIFICATIVO).

IDENTIFICAÇÃO DO EFEITO	INTERVALO DE CONFIANÇA	INDICAÇÃO
α	(-285,96 ; -102,92)	S
T	(-92,16 ; 90,88)	NS
H	(-344,93 ; -161,89)	S
D	(77,77 ; 260,81)	S
TH	(-83,98 ; 99,06)	NS
TD	(-90,43 ; 92,61)	NS
HD	(-154,46 ; 28,58)	NS
T α	(-137,76 ; 45,28)	NS
H α	(-8,58 ; 174,46)	NS
D α	(-54,88 ; 128,16)	NS

Portanto os efeitos significativos são os efeitos principais “ α ”, “H” e “D”.

Como não há evidências de interação entre duas dessas variáveis, deve-se partir para a interpretação individual de cada uma delas.

EFEITO H



O AUMENTO DA ALTURA DO LEITO ESTÁTICO IMPLICA EM UMA DIMINUIÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA DA REGIÃO DE JORRO.

De maneira igual à região anular, o aumento da carga de partículas contribui para o decréscimo do coeficiente.

EFEITO D

$D(-)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $dp = 2$ mm

$D(+)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $dp = 3$ mm



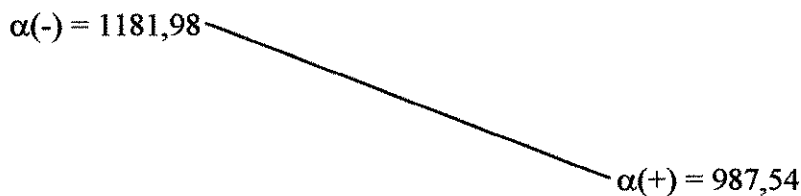
O AUMENTO DO DIÂMETRO DAS PARTÍCULAS IMPLICA EM UM AUMENTO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA DA REGIÃO DE JORRO.

Também na região de jorro o aumento na velocidade relativa sólido-gás contribui para o aumento no valor do coeficiente de transferência de calor gás-partícula.

EFEITO α

$\alpha(-)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $\alpha = 45^\circ$

$\alpha(+)$ = média dos coeficientes obtidos nas corridas com $\alpha = 60^\circ$



O COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR GÁS-PARTÍCULA É MAIOR NAS CORRIDAS REALIZADAS COM O ÂNGULO DE 45° , DO QUE NAS CORRIDAS REALIZADAS COM O ÂNGULO DE 60° .

A circulação dos sólidos para as corridas realizadas com bases inclinadas de 60° é melhor do que aquelas realizadas com bases inclinadas de 45° . O tempo de residência das partículas na região anular é maior para o ângulo de 45° e portanto ficam mais tempo em contato com o gás quente que entra percolando na região próxima à base do

leito. Isto contribui para o aumento da temperatura das partículas que entram na região de jorro contribuindo para o aumento do coeficiente de transferência de calor gás-partícula.

4.4 - ANÁLISE RESIDUAL

Os efeitos podem ser representados por um modelo descrito da seguinte forma:

$$Y = \bar{Y} + \tau + e_i \quad (4.14)$$

onde

\bar{Y} = média geral de todos os coeficientes

τ = componente devido à influência dos efeitos significativos

e_i = componente do erro aleatório

A suposição a respeito da componente de erros (resíduos) é que estes são variáveis aleatórias normais, independentes e identicamente distribuídos, com média zero e variância σ^2 . A análise residual serve para verificar se as suposições do modelo foram satisfeitas.

A figura 4.4 mostra o gráfico de densidade de probabilidade de uma distribuição normal, que é simétrico em torno do ponto central que é a média μ . O valor da densidade é máximo sobre a média e vai caindo rapidamente ao nos afastarmos dela, em ambas as direções.

A função densidade de probabilidade para a distribuição normal é dada por:

$$f(x) dx = [1 / (2\pi)^{1/2} \cdot \sigma] \cdot e^{-(x - \mu)^2 / 2\sigma^2} dx \quad (4.15)$$

O produto $f(x) dx$ é por definição a probabilidade de ocorrência de um valor da variável aleatória no intervalo de largura dx em torno de x . Nota-se da figura 4.4 que a maior parte da área sob a curva normal está contida no intervalo definido por um desvio padrão em torno da média e que praticamente toda ela está situada entre $\mu - 3\sigma$

e $\mu+3\sigma$. Os valores numéricos correspondentes a esses fatos são obtidos integrando-se entre os limites apropriados a expressão de $f(x)$ dada pela equação 4.15.

$$P(\mu-\sigma < x < \mu+\sigma) = 0,682 \text{ (ou 68,2 \%)}$$

$$P(\mu-2\sigma < x < \mu+2\sigma) = 0,954 \text{ (ou 95,4 \%)}$$

$$P(\mu-3\sigma < x < \mu+3\sigma) = 0,997 \text{ (ou 99,7 \%)}$$

Se uma população desviar-se muito da normalidade, podemos esperar descobrir alguma evidência desse comportamento se as frequências amostrais afastarem-se das frequências previstas pela distribuição normal.

Uma análise que também pode ser feita é quanto à existência de “outliers”, que são pontos que apresentam um resíduo bem maior que os outros da amostra e devem ser analisados cuidadosamente pois podem prejudicar a análise estatística e muitas vezes representam um erro, seja de cálculo ou então na coleta de dados. A maneira formal de detectar “outliers” é o exame dos resíduos padronizados (d_i):

$$d_i = \frac{e_i}{\sqrt{QM_E}} \quad (4.16)$$

Os resíduos padronizados permitem suspeitar de “outliers” se $|d_i|$ for superior a 4.

A independência das unidades amostrais é visualizada através de um gráfico de resíduos versus a ordem de sequência em que foram feitos os testes. Os pontos do gráfico não devem apresentar um padrão bem definido.

Um gráfico de resíduos versus valores estimados pelo modelo serve para mostrar a homogeneidade das variâncias, que é uma das suposições mais importantes na construção do modelo.

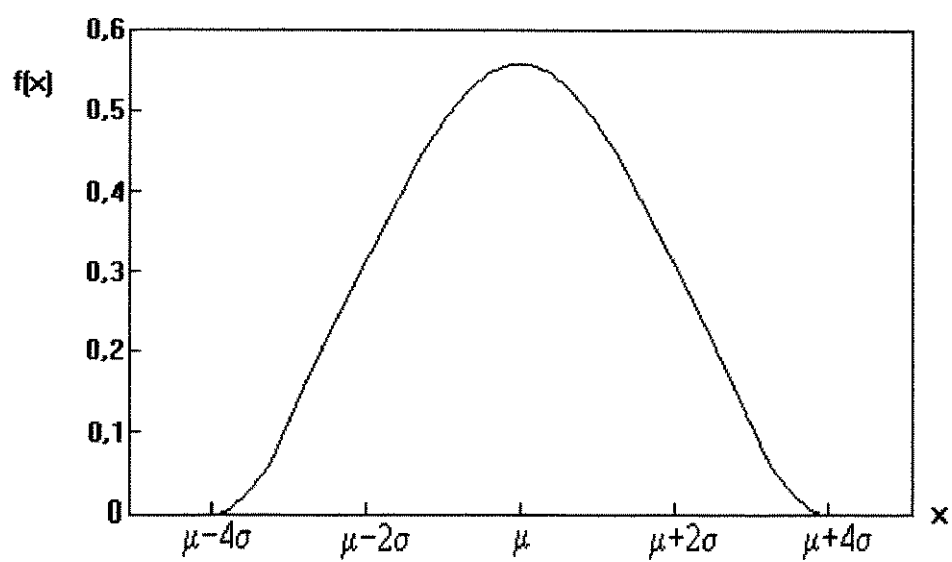


FIGURA 4.4 - DISTRIBUIÇÃO NORMAL

4.4.1 - ANÁLISE RESIDUAL PARA A REGIÃO ANULAR

O modelo para a região anular é construído utilizando-se os efeitos significativos “ α ”, “H”, “D” e “D α ”, que constituem os coeficientes da equação. A cada efeito principal é associado uma variável da seguinte forma:

efeito T $\rightarrow X_1$

efeito H $\rightarrow X_2$

efeito D $\rightarrow X_3$

efeito $\alpha \rightarrow X_4$

De acordo com a equação 4.14, os resíduos são calculados fazendo-se a diferença entre os coeficientes medidos e os coeficientes estimados (Y_e) que são calculados pela equação:

$$Y_e = \bar{Y} + \tau \quad (4.17)$$

onde τ é a componente devido à influência dos efeitos significativos. a equação para Y_e fica então da seguinte forma:

$$Y_e = \bar{Y} + \frac{H}{2} \cdot X_2 + \frac{D}{2} \cdot X_3 + \frac{\alpha}{2} \cdot X_4 + \frac{D\alpha}{2} \cdot X_3 X_4 \quad (4.18)$$

ou

$$Y_e = 10,91 - 1,195 \cdot X_2 + 2,58 \cdot X_3 + 1,03 \cdot X_4 + 0,73 \cdot X_3 X_4 \quad (4.19)$$

onde X_2 , X_3 , X_4 assumem o valor -1 ou +1 de acordo com as colunas “H”, “D” e “ α ” da tabela 4.7. Os coeficientes que aparecem na equação correspondem aos efeitos calculados divididos por 2. Isto é devido ao fato de que uma mudança de $X = -1$ para $X = +1$ corresponde a uma variação de duas unidades ao longo do eixo “x”. A tabela 4.14 apresenta os coeficientes calculados, os coeficientes estimados, os resíduos e os resíduos padronizados para cada corrida.

Para a região anular, os resíduos apresentaram média igual a 0,01875 e desvio padrão de 0,5049. Com esses valores, determinamos os intervalos $(\bar{X} - s, \bar{X} + s)$, $(\bar{X} - 2s, \bar{X} + 2s)$, $(\bar{X} - 3s, \bar{X} + 3s)$ verificamos que eles contém respectivamente 68,26 %, 95,44 % e 99,24 % da área total do histograma amostral, valores que estão em ótima concordância com os valores amostrais. Portanto, a julgar por isto, podemos aceitar a hipótese de normalidade dos resíduos para a região anular. A análise dos resíduos padronizados indicam a não existência de “outliers” pois o maior valor encontrado foi de 1,89.

A figura 4.5 mostra o gráfico dos resíduos versus a ordem de execução das corridas, que não mostra um padrão bem definido, indicando portanto a independência dos resíduos. A figura 4.6 mostra o gráfico dos resíduos versus os valores estimados pelo modelo indicando a homogeneidade das variâncias.

TABELA 4.14 - RESÍDUOS CALCULADOS PARA REGIÃO ANULAR

COEFICIENTES MEDIDOS	ESTIMATIVA PELO MODELO	RESÍDUO	RESÍDUO PADRONIZADO
9,3	9,2	0,1	0,17
8,9	9,2	-0,3	-0,52
7,5	6,8	0,7	1,2
6,4	6,8	-0,4	-0,69
12,7	12,9	-0,2	-0,34
13,2	12,9	0,3	0,52
11,6	10,5	1,1	1,89
9,4	10,5	-1,1	-1,89
9,7	9,8	-0,1	-0,17
9,8	9,8	0	0
7,6	7,4	0,2	0,34
7,4	7,4	0	0
16,6	16,4	0,2	0,34
16,6	16,4	0,2	0,34
13,5	14,1	-0,6	-1,03
14,3	14,1	0,2	0,34

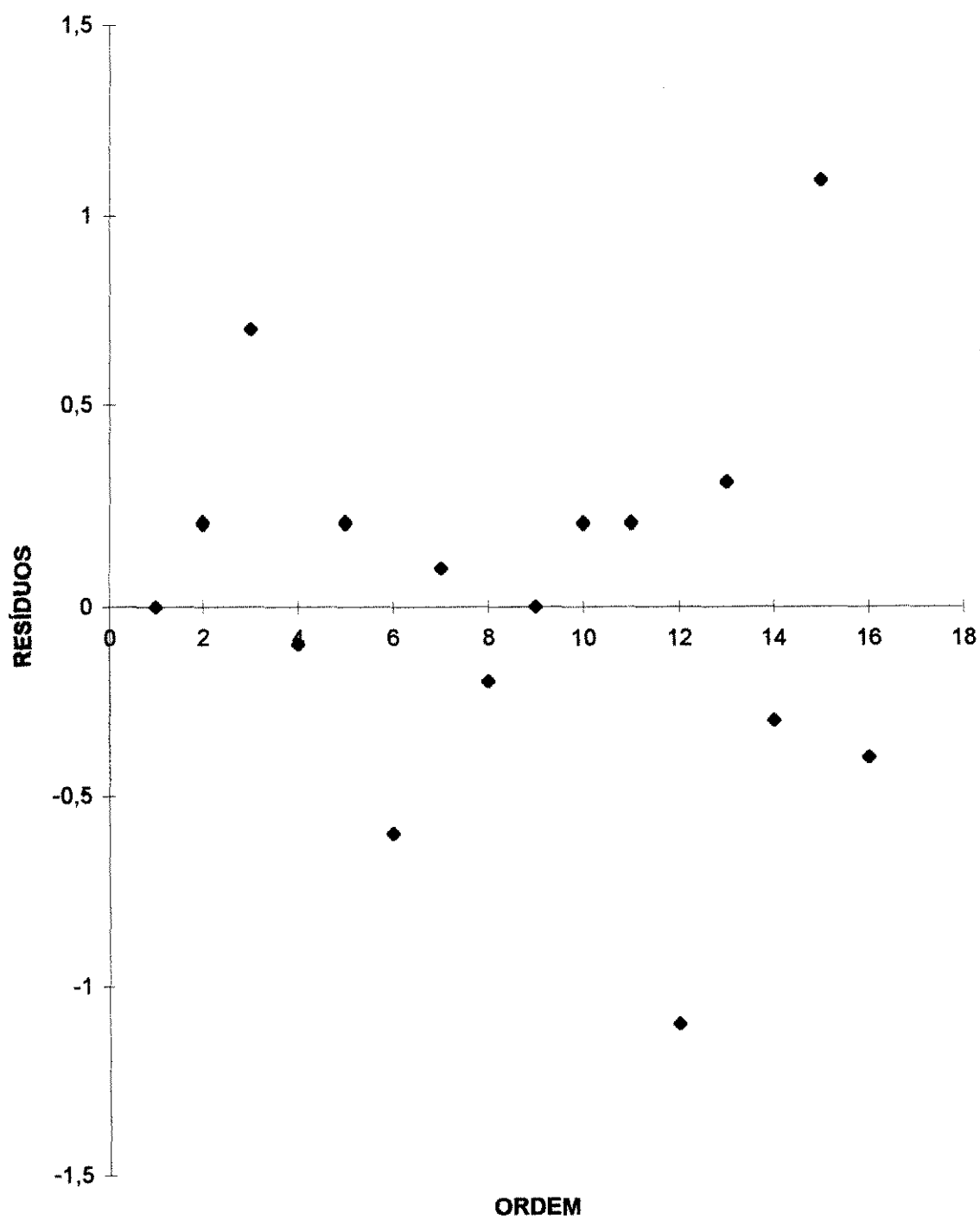


FIGURA 4.5 - INDEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS PARA REGIÃO ANULAR

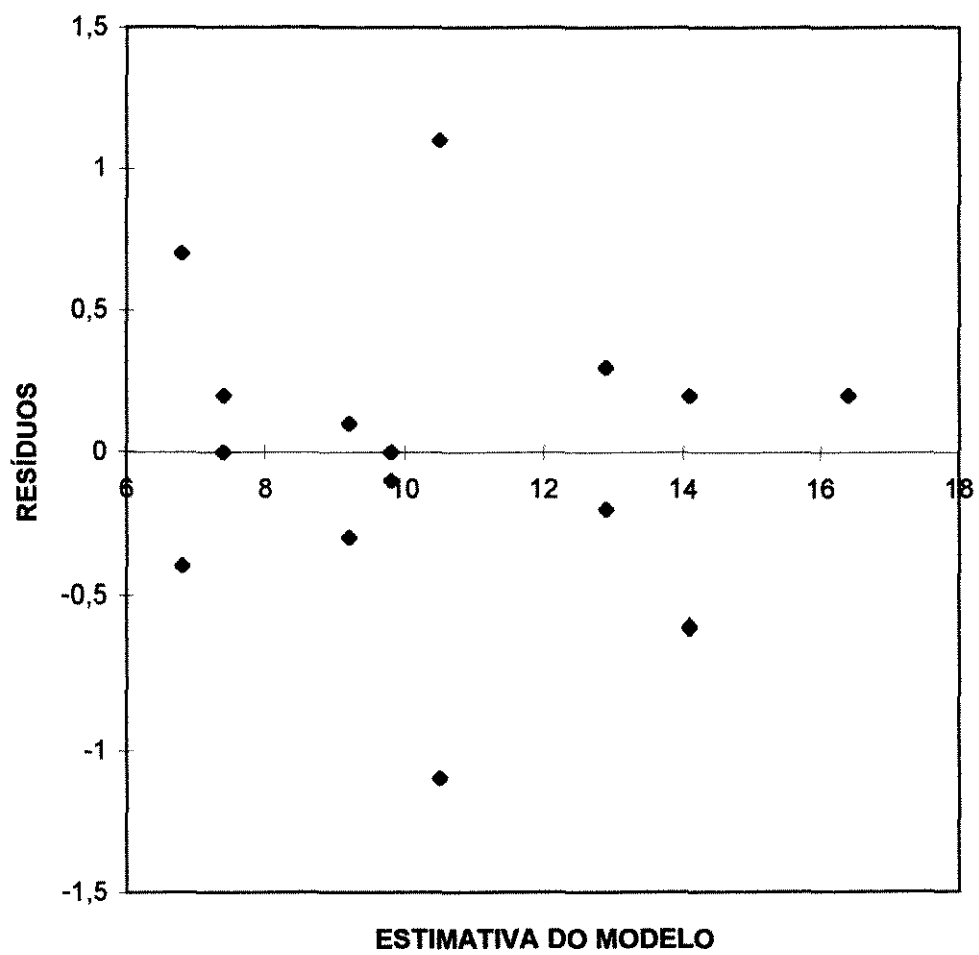


FIGURA 4.6 - HOMOGENEIDADE DA VARIÂNCIA PARA REGIÃO ANULAR

4.4.2 - ANÁLISE DOS RESÍDUOS PARA A REGIÃO DE JORRO

O modelo para a região de jorro é construído utilizando-se os efeitos significativos “H”, “D”, e “α”, e foi construído seguindo a mesma metodologia usada para a construção do modelo na região anular. A equação para Y_e fica portanto da seguinte forma:

$$Y_e = \bar{Y} + \frac{H}{2} \cdot X_2 + \frac{D}{2} \cdot X_3 + \frac{\alpha}{2} \cdot X_4 \quad (4.20)$$

ou

$$Y_e = 1084,76 - 126,71 \cdot X_2 + 84,65 \cdot X_3 - 97,22 \cdot X_4 \quad (4.21)$$

A tabela 4.15 apresenta os coeficientes calculados, os coeficientes estimados, os resíduos e os resíduos padronizados para cada corrida. Para a região de jorro, os resíduos apresentaram média igual a 0,00625 e desvio padrão de 76,01. Com esses valores, determinamos os intervalos $(\bar{X} - s, \bar{X} + s)$, $(\bar{X} - 2s, \bar{X} + 2s)$, $(\bar{X} - 3s, \bar{X} + 3s)$ verificamos que assim como na região anular, eles contém respectivamente 68,26 %, 95,44 % e 99,24 % da área total do histograma amostral. Portanto, também na região de jorro podemos aceitar a hipótese de normalidade dos resíduos. A análise dos resíduos padronizados não indica a existência de “outliers” pois o maior valor encontrado foi de 1,7764.

As figuras 4.7 e 4.8 mostram o gráfico dos resíduos versus a ordem de execução das corridas e o gráfico dos resíduos versus os valores estimados pelo modelo, mostrando a independência dos resíduos e a homogeneidade das variâncias respectivamente.

TABELA 4.15 - RESÍDOS CALCULADOS PARA A REGIÃO DE JORRO

COEFICIENTES MEDIDOS	ESTIMATIVA PELO MODELO	RESÍDUO	RESÍDUO PADRONIZADO
1225,4	1224,0	1,4	0,0197
1286,8	1224,0	62,8	0,8819
1006,2	970,6	35,6	0,4999
944,2	970,6	-26,4	-0,3707
1368,6	1393,3	-24,7	-0,3469
1519,8	1393,3	126,5	1,7764
1036,5	1139,9	-103,4	-1,4520
1068,3	1139,9	-71,6	-1,0055
923,9	1029,6	-105,7	-1,4843
945,3	1029,6	-84,3	-1,1838
848,4	776,2	72,2	1,0139
820,7	776,2	44,5	0,6249
1313,6	1198,9	114,7	1,6107
1108,3	1198,9	-90,6	-1,2723
958,0	945,5	12,5	0,1755
982,1	945,5	36,6	0,5140

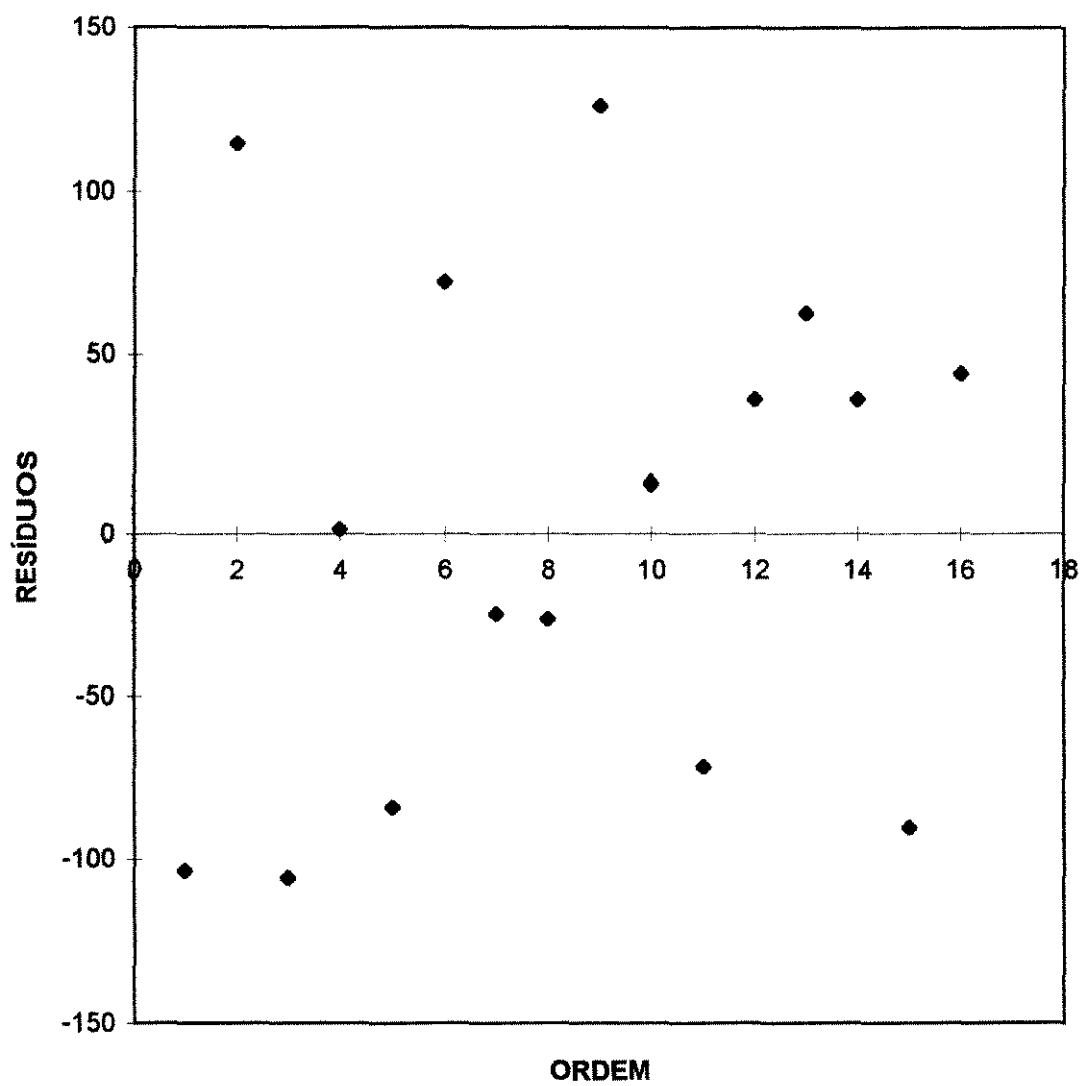


FIGURA 4.7 - INDEPENDÊNCIA DOS RESÍDUOS PARA REGIÃO DE JORRO

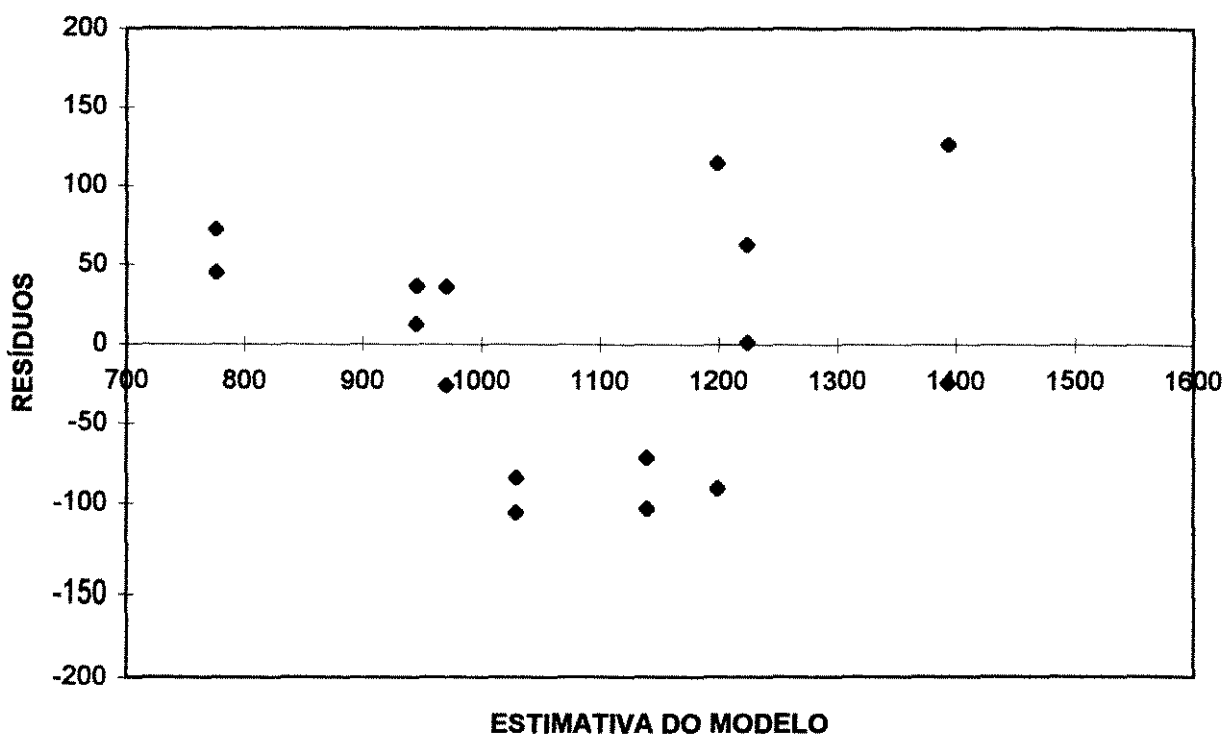


FIGURA 4.8 - HOMOGENEIDADE DA VARIÂNCIA PARA REGIÃO DE JORRO

4.5 - ANÁLISE DOS GRÁFICOS

Após a análise do planejamento fatorial de experimentos, foram realizadas corridas com outros valores das variáveis altura do leito estático ($H_o = 23 \text{ cm}$) e temperatura de entrada do gás ($T_{G1} = 65 \text{ }^{\circ}\text{C}$) com o objetivo de corroborar os resultados. As figuras 4.9 a 4.14 mostram o coeficiente de transferência de calor gás-partícula para a região de jorro em função das variáveis estudadas. Como pode-se notar, os gráficos confirmam os resultados obtidos no planejamento fatorial de experimentos.

As figuras 4.15 a 4.20 mostram os mesmos gráficos para a região anular que assim como na região de jorro confirmam os resultados do planejamento fatorial.

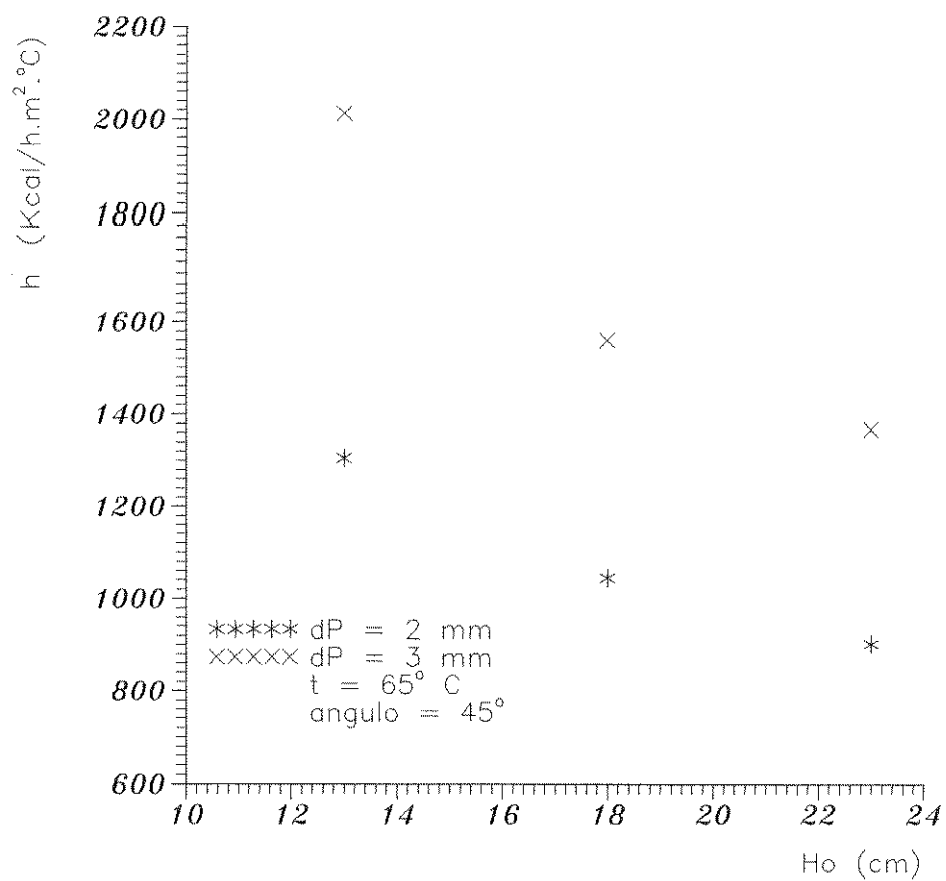


FIGURA 4.9 – Coeficiente de transf. calor Convectivo x Altura Inicial do Leito

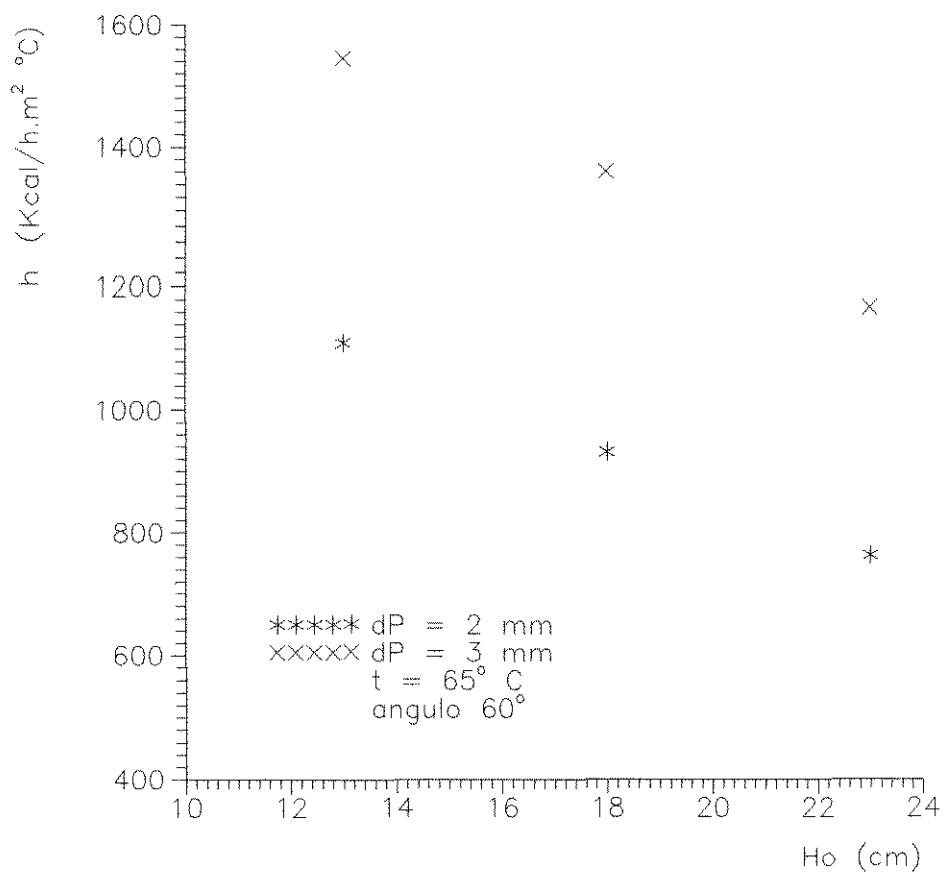


FIGURA 4.10 – Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Altura Inicial do Leito

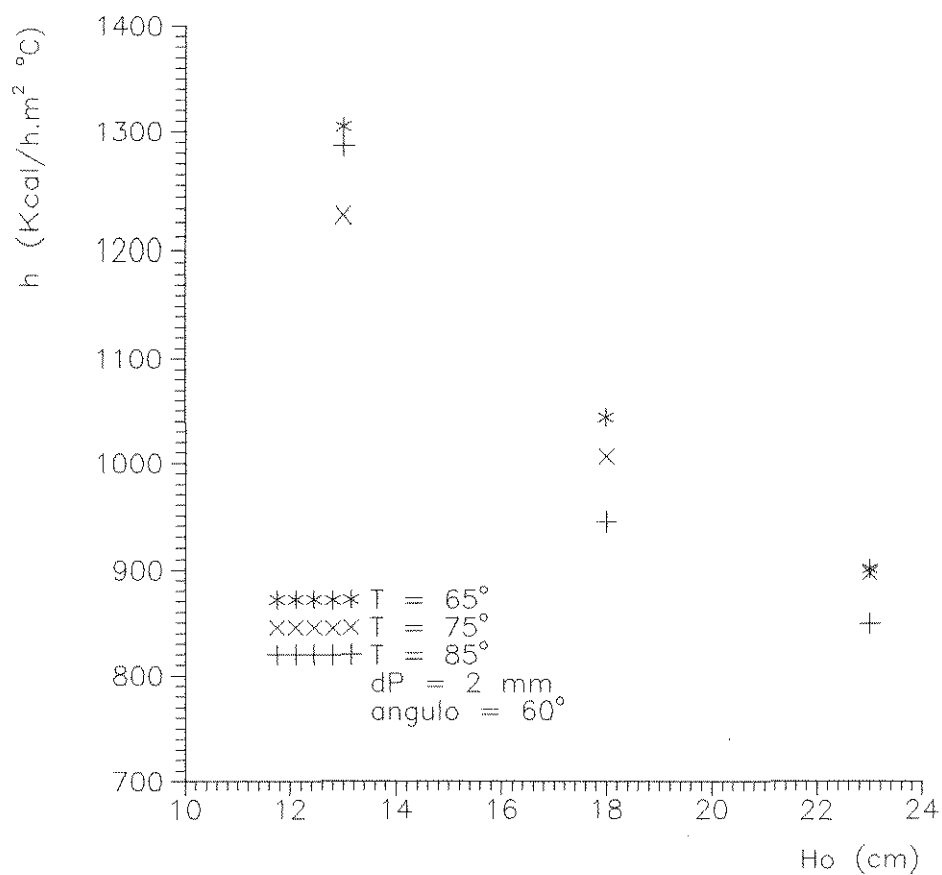


FIGURA 4.11 – Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Altura Inicial do Leito

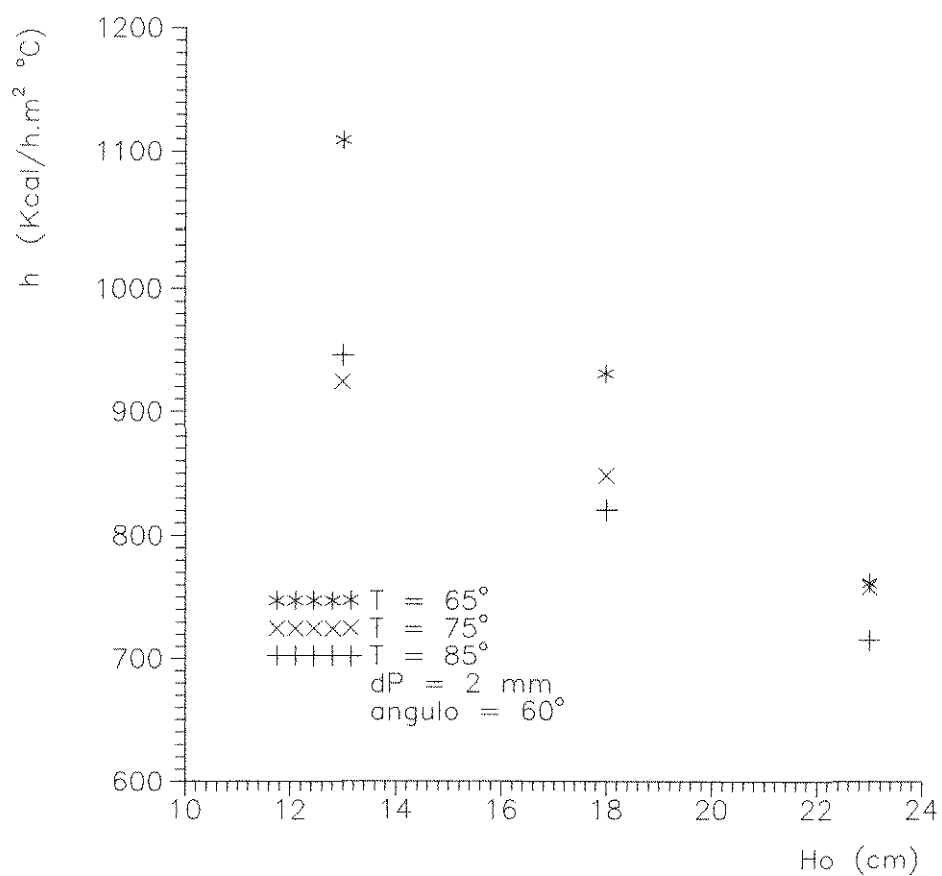


FIGURA 4.12 — Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Altura Inicial do Leito

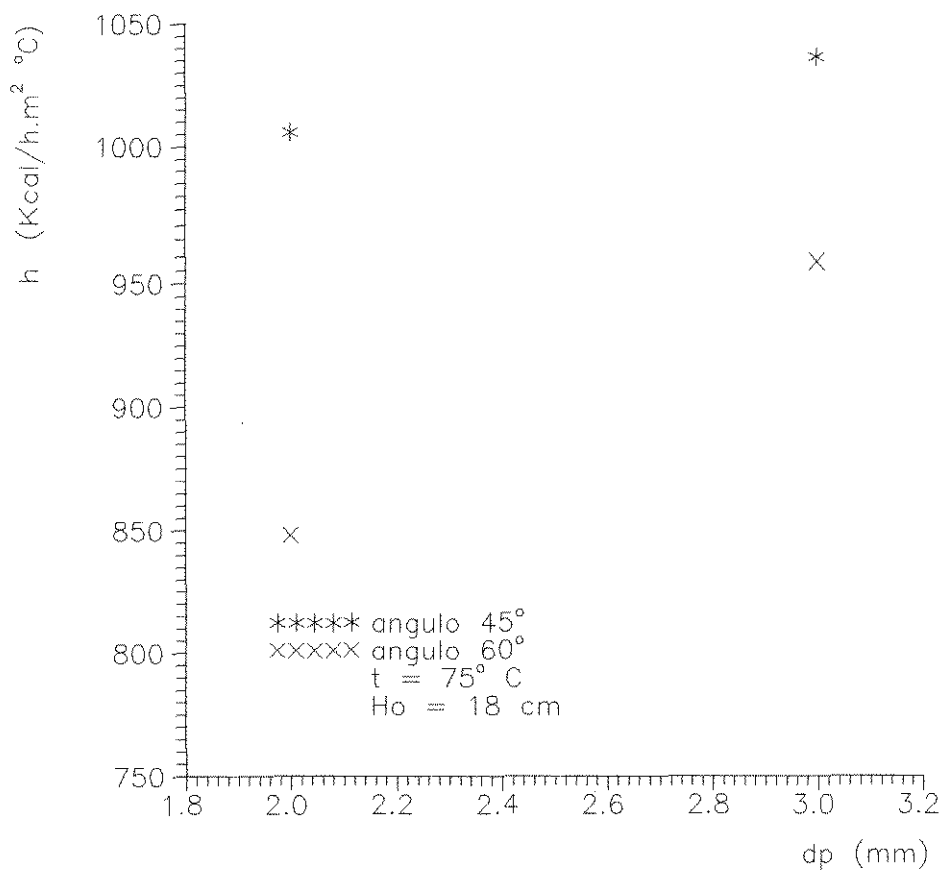


FIGURA 4.13 – Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Diametro das particulas

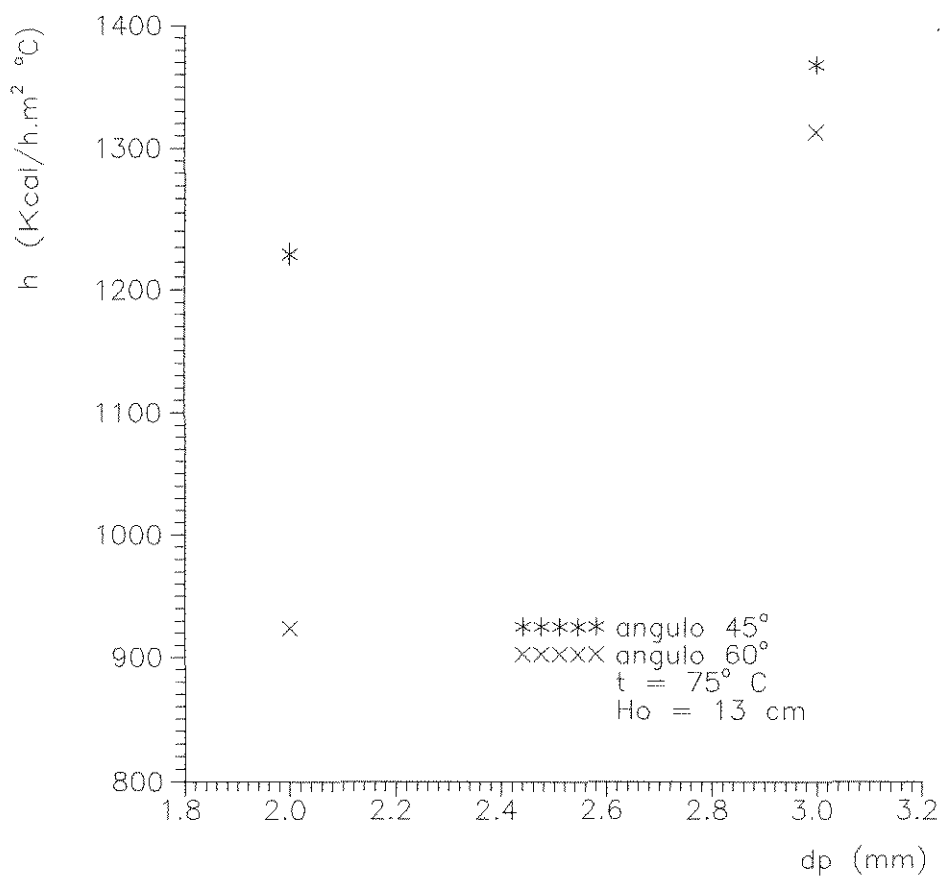


FIGURA 4.14 – Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Diametro das particulas

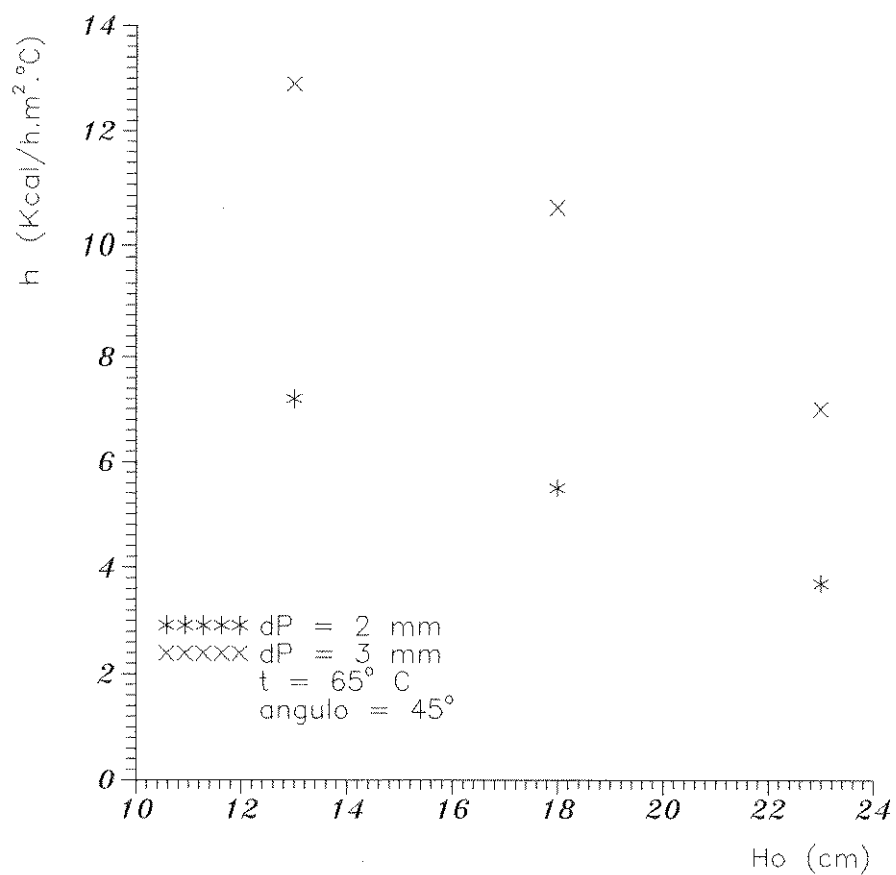


FIGURA 4.15 – Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Altura Inicial do Leito

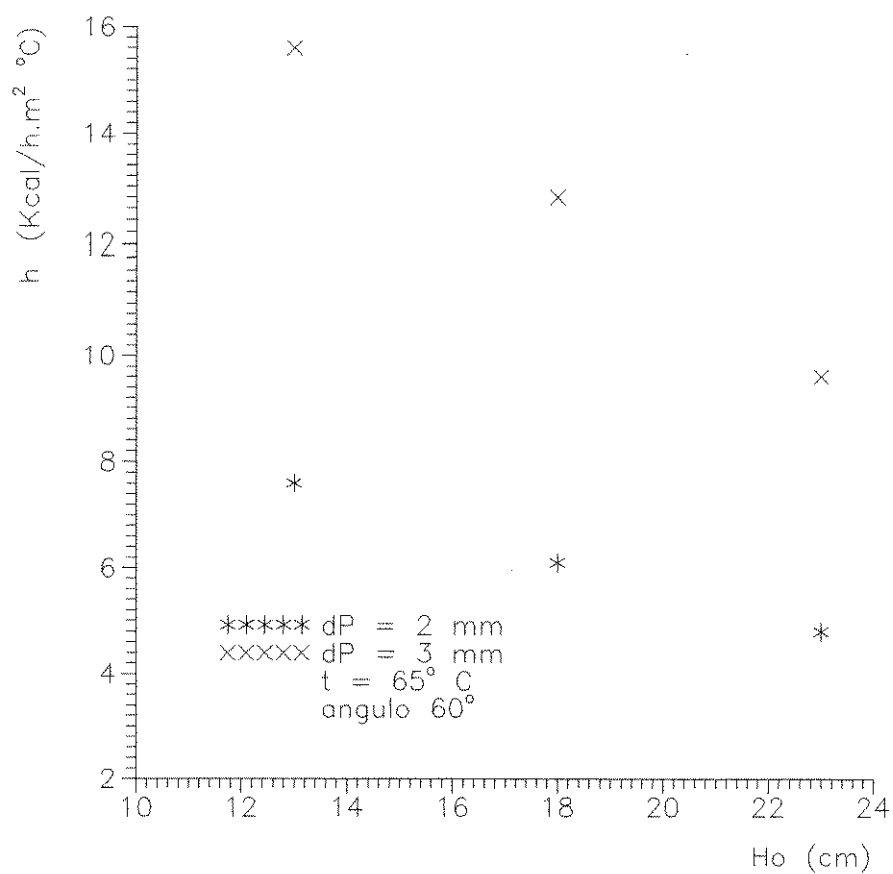


FIGURA 4.16 — Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Altura Inicial do Leito

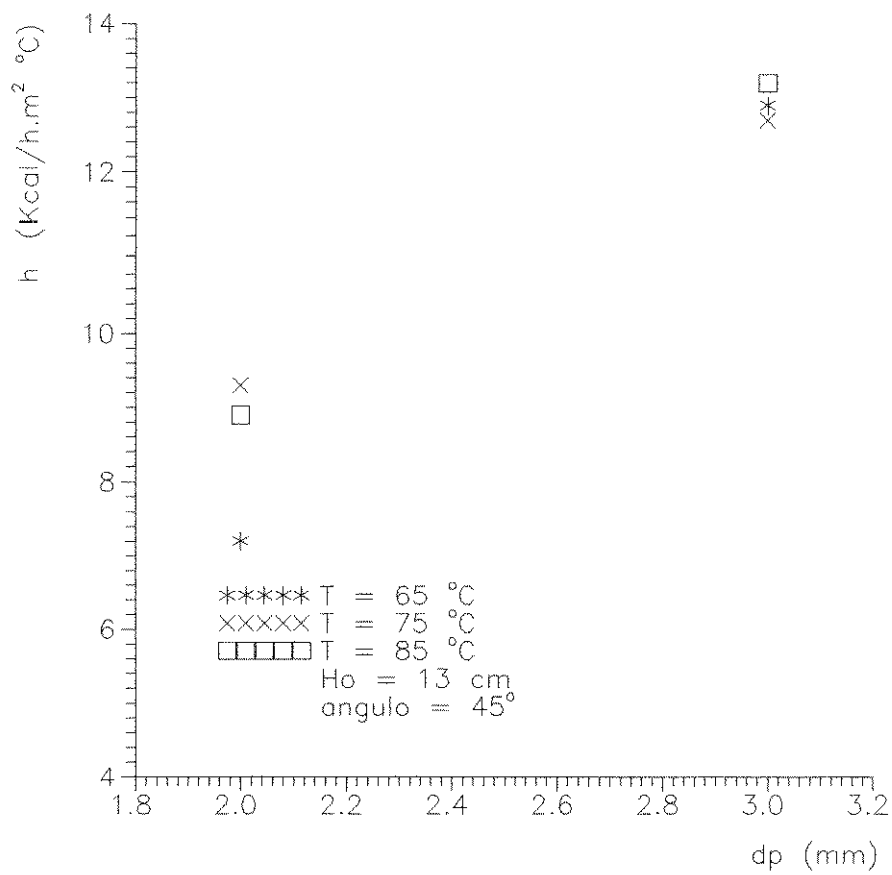


FIGURA 4.17 – Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Diametro das particulas

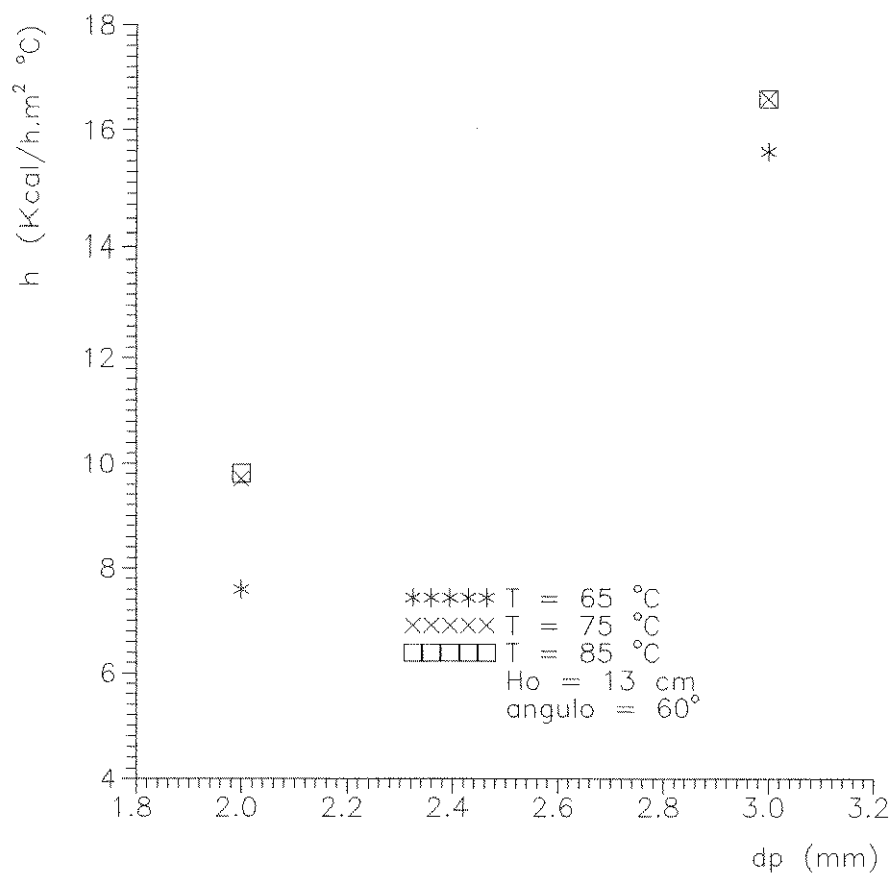


FIGURA 4.18 – Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Diametro das particulas

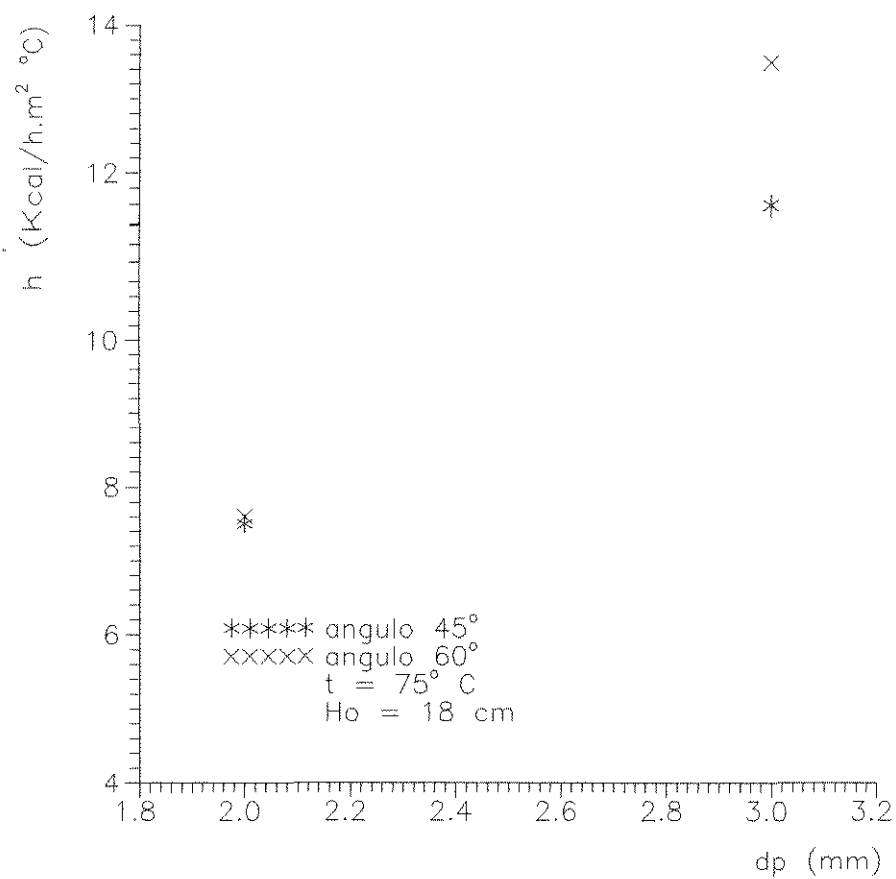


FIGURA 4.19 — Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Diametro das particulas

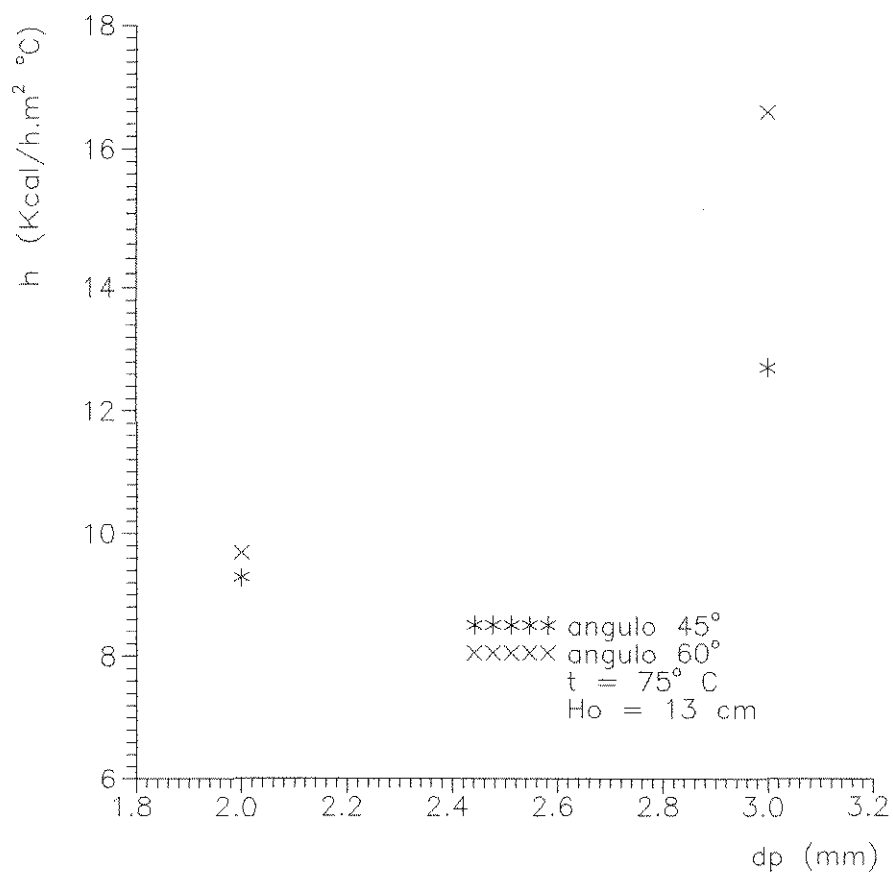


FIGURA 4.20 — Coeficiente de Transf. Calor Convectivo x Diâmetro das partículas

4.6 - DESENVOLVIMENTO DAS CORRELAÇÕES

Com os valores obtidos nas corridas do planejamento fatorial, foram estabelecidas duas correlações, sendo uma para a região anular e outra para a região de jorro, como também era um dos objetivos do trabalho. Chegou-se às correlações utilizando-se o método de Marquardt, que faz a estimativa de parâmetros em equação não-linear (regressão não-linear). As correlações mostram Nusselt em função do número de Reynolds para cada região, da altura do leito estático, do diâmetro das partículas e do ângulo da base inclinada.

4.6.1 - CORRELAÇÃO PARA A REGIÃO ANULAR

A equação 4.22 representa a correlação obtida para a região anular que é válida para alturas de leito estático entre 13 e 28 cm, diâmetro de partícula entre 2 e 3 mm e ângulo da base inclinada entre 45 e 60°:

$$Nu_a = 111,06 \cdot Re_a^{0,47329} \cdot \left(\frac{H_o}{dp} \right)^{-1,5355} \cdot \left(tg(\alpha/2) \right)^{0,77982} \quad (4.22)$$

onde:

$$Re_a = \frac{v_a \cdot dp \cdot \rho_a}{\mu_a}$$

v_a = velocidade do gás na região anular.

μ_a = viscosidade do gás na temperatura média da região anular.

ρ_a = densidade do gás na temperatura média da região anular.

A figura 4.22 motra o gráfico dos valores experimentais versus os valores calculados pela equação 4.24. Para a região de jorro encontrou-se um desvio médio relativo igual a 0.0206, W_i médio igual a 0,9987 com desvio padrão de 0,028..

As figuras 4.21 e 4.22 mostraram boa concordância entre os valores experimentais e os valores calculados pelas duas correlações e juntamente com os desvios calculados validam o uso das correlações dentro dos limites especificados tanto para a região anular quanto para a região de jorro.

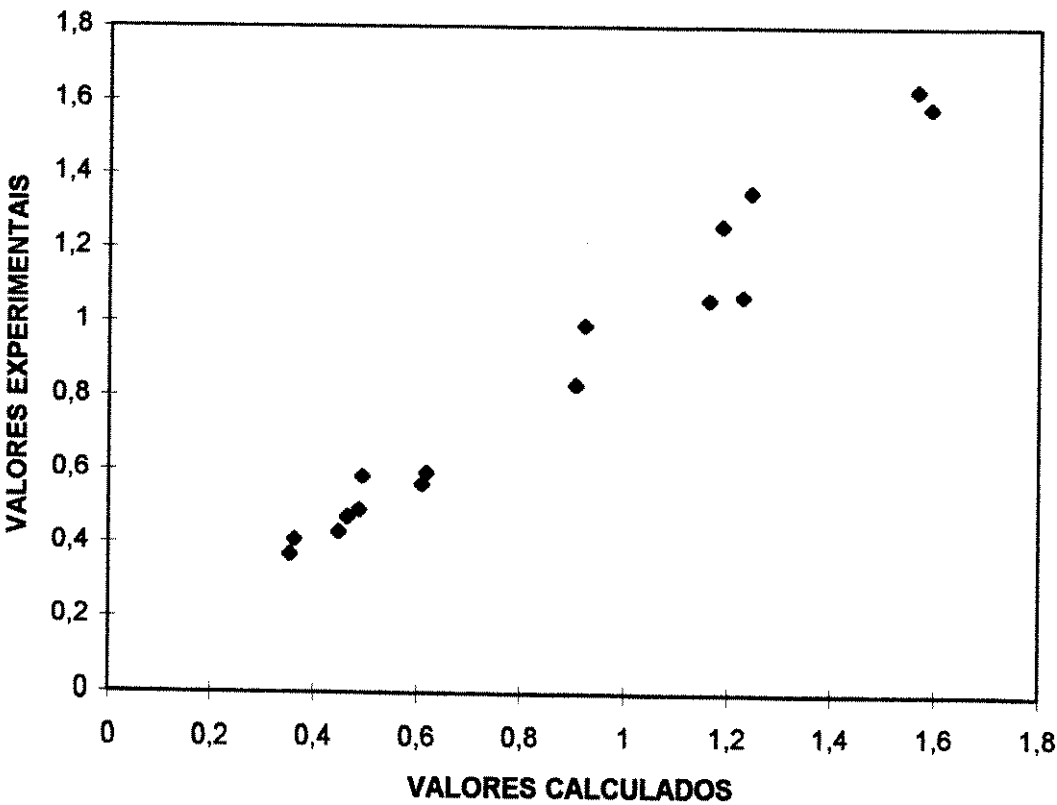


FIGURA 4.21 - CORRELAÇÃO PARA REGIÃO ANULAR.

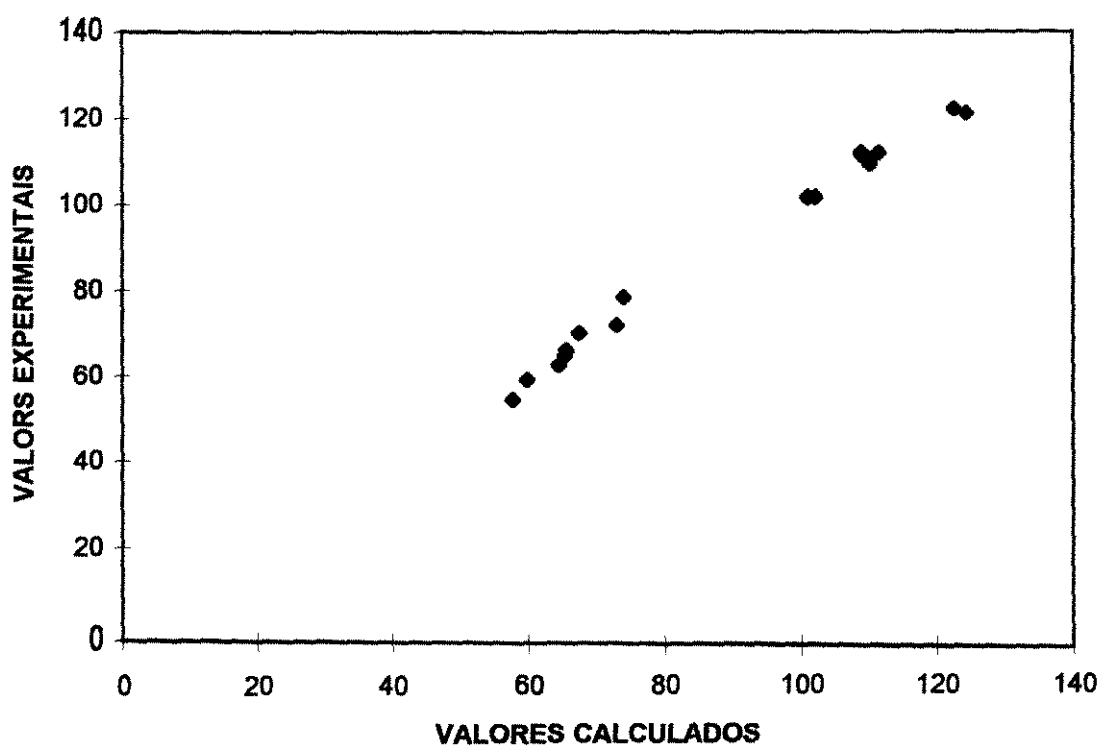


FIGURA 4.22 - CORRELAÇÃO PARA REGIÃO DE JORRO.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O objetivo principal deste trabalho foi demonstrar como as diferenças evidentes que existem entre as regiões de jorro e anular afetam o coeficiente de transferência de calor gás-partícula sendo portanto necessário um cuidado especial ao estudar transferência de calor em leito de jorro. Os valores encontrados para os coeficientes e os resultados obtidos com a análise dos efeitos no planejamento fatorial demonstram estas diferenças tornando justificável a obtenção de correlações independentes para a região de jorro e anular.

Em ambas as regiões o valor do coeficiente diminui com o aumento da altura do leito estático e diminuição do diâmetro das partículas. Entretanto a relação com o diâmetro no caso da região anular é também influenciada pelo ângulo da base inclinada sendo mais evidente para o ângulo de 60° . Por outro lado, na região de jorro não há interação entre as influências do diâmetro das partículas e ângulo da base inclinada, sendo que neste caso é o leito com ângulo de 45° que apresenta maiores valores para o coeficiente.

A base inclinada de 60° é melhor para ser utilizada pois apresenta resultados satisfatórios e oferece uma circulação de sólidos muito melhor do que a base de 45° . A base inclinada de 30° mostrou-se inadequada neste leito específico visto que era impossível uma boa circulação de sólidos.

Foram obtidas duas correlações independentes para as regiões de jorro e anular, válidas para as faixas de uso especificadas que descrevem bem o comportamento do coeficiente de transferência de calor gás-partícula já que os desvios

em relação aos dados experimentais encontram-se dentro de uma faixa considerada satisfatória.

Em vista do que foi estudado e dos resultados obtidos ficam as seguintes sugestões para trabalhos posteriores:

- fazer o estudo em um leito de dimensões maiores (“scale-up” do equipamento);
- estudar outros tipos e formatos de partículas como grãos de diversas formas;
- ampliar o planejamento fatorial para estudar a influência de outras variáveis tais como o comprimento das placas internas, ausência das placas internas, distância das placas internas ao fundo do leito, etc.;
- modelagem e simulação da transferência de calor gás-partícula em leito de jorro bidimensional separadamente para as regiões de jorro e anular;
- extensão do estudo para aplicações práticas como secagem de grãos ou recobrimento de comprimidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MATHUR, K. B. & EPSTEIN, N. Spouted Beds. Academic Press, N.Y. USA, 1974. 304p.
2. PERRY, R. H. & CHILTON, C.H. The Chemical Engineers' Handbook. 5th ed., McGraw-Hill Book Company, New York, 1973.
3. MUJUMDAR, A. S. Drying' 84, Hemisphere Publishing Corp., p. 151, USA, 1984.
4. KUDRA, T.; MUJUMDAR, A. S. & RAGHAVAN, G. S. V. Int. Comm. Heat Mass Transfer, 15: 731-741, 1989.
5. EPSTEIN, N. & MATHUR, K. B. Can. J. Chem. Eng. , 49: 467-476, 1971.
6. UEMAKI, O. & KUGO, M. Kagaku Kogaku, 31(4): 348-453, 1967.
7. ROWE, P. N. & CLAXTON, K. T. Trans. Inst. Chem. Engrs. , 43: T-321, 1965.
8. LITTMAN, H. & SILVA, D. E. Fourth International Heat Transfer Conference, paper no. CT 14, Paris, 1970.
9. BARTON, R. K. & RATCLIFFE, J. S. Mech. and Chem. Eng. Trans., 5: 35, 1969.
10. KMIEC, A. Can. J. Chem. Eng., 53: 18-24, 1975.
11. ROMANKOV, P. G. & RASHKOVSKAYA, N. B. Drying in a Suspended State, Leningrad, 1968.
12. KMIEC, A. Chem. Eng. Journal, 19: 189-200, 1980.
13. KACZMARZYK, G. & BANDROWSKI, J. Chem. Eng. Sci., 33: 1303, 1978.
14. PETROVIC, L. J. & THODOS, G. Can. J. Chem. Eng., 46: 114, 1968.
15. FREIRE, J. T. RBE. Caderno de Engenharia Química, 3(2): 39-62, 1991.
16. KALWAR, M. I.; RAGHAVAN, G. S. V.; MUJUMDAR, A. S. & FANOUS M. A. Drying' 89, Hemisphere Publishing Corp., pp. 433-439, USA, 1991.
17. TARANTO, O. P. Estudo Experimental da Dinâmica em um Leito de Jorro Bidimensional: Aplicação em Recobrimento de Comprimidos. Campinas- SP, UNICAMP, 1992. (Dissertação de Mestrado).

18. KREITH, FRANK Princípios da Transmissão de Calor. Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo Brasil, 1977. 550p.
19. MAMURO, T. & HATTORI, H. J. Chem. Eng. Japan, 1: 1-5, 1968.
20. STOCKER, R. K.; ENG, J. H. & BEHIE, L. A. Can. J. Chem. Eng., 68: 302-311, 1990.
21. DAVIDSON, J. F. & HARRISON, D. Fluidization. Academic Press, N. Y. USA, 1971. 847p.
22. BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. Statistics for Experimenters. John Willey, N. Y. USA, 1978.